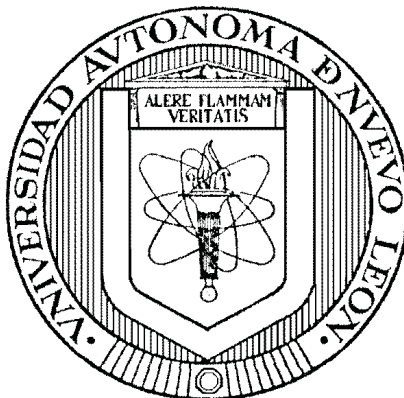


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DIAGNÓSTICO DE FALLAS DE SISTEMAS OPERANDO EN LAZO
CERRADO

POR

ING. ÁLVARO DANIEL GONZÁLEZ YZCOA

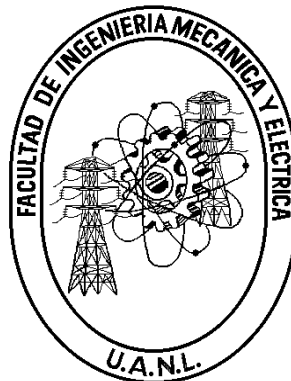
TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ORIENTACIÓN
EN CONTROL AUTOMÁTICO

CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DEL 2012

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DIAGNÓSTICO DE FALLAS DE SISTEMAS OPERANDO EN LAZO
CERRADO

POR

ING. ÁLVARO DANIEL GONZÁLEZ YZCOA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ORIENTACIÓN
EN CONTROL AUTOMÁTICO

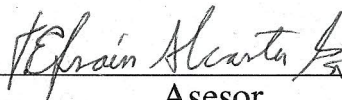
CD. UNIVERSITARIA

NOVIEMBRE DEL 2012

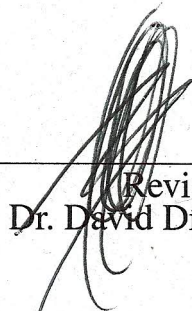
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis **“Diagnóstico de fallas de sistemas operando en lazo cerrado”** realizada por el alumno **Ing. Álvaro Daniel González Yzcoa**, matrícula número **1240348** sea aceptada por su defensa como opción al grado de **Maestro en Ciencias** de la Ingeniería Eléctrica con Orientación en Control Automático.

El Comité de Tesis



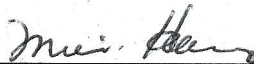
Asesor
Dr. Efraín Alcorta García



Revisor:
Dr. David Díaz Romero



Revisor:
Dr. Alejandro Rodríguez Solís



Vo. Bo.
Dr. Moisés Hinojosa Rivera
División de Estudios de Posgrado

Cd. Universitaria, a Noviembre del 2012

Este trabajo se lo dedico

... a Dios y su hijo Jesucristo

*... a mis padres Álvaro González Benavides y
Maria Elena Yzcoa Saenz*

... a mi Asesor el Dr. Efraín Alcorta García

... a mis hermanos Ricardo y Miguel Angel

... a todos mis familiares

... a Ministerios Hebrón

... y mi Pastor.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por hacer el milagro de darme vida día a día, y es gracias a su misericordia que el me dió la capacidad para poder terminar este trabajo de tesis.

Gracias a mis padres que con su amor y comprensión es que he podido llegar hasta este nivel, a mis hermanos por estar siempre ahí en los momentos en los que más los necesitaba.

Gracias a mi Asesor el Dr. Efraín Alcorta García por su paciencia y por creer en mí, aún con todas las adversidades que se presentaron durante la realización de este trabajo.

Gracias a mis compañeros Filiberto, Luis Fernando, Sara, Omar, Eduardo, Leonela, Raúl, Raúl Aguirre, Alejandro Curti, Carlos Castillo, Cutberto, Edgar Rojas, Eliezer y todos los integrantes del cuerpo estudiantil del "DIE", por su tiempo, su amistad y todo lo que han hecho por mí.

Gracias a mis maestros y mentores el Dr. Efraín Alcorta García, el Dr. Cornelio Posadas Castillo, el Dr. René Galindo Orozco, el Dr. Marco Túlio Mata Jiménez, el Dr. Jesús de León Morales, el Dr. Alberto Cavazos González y a todos los Doctores que nos pusieron las difíciles pruebas y tareas para poder realizar con satisfacción este trabajo.

Gracias a la coordinación de Control Automático, al M.C. Antonio Rodríguez García, al Dr. Cornelio Posadas Castillo, a la M.C. Claudia Alina Madrigal, a la M.C. Elizabeth Guadalupe Lara Hernández, al M.C. José Guadalupe Ríos, al M.C. Guadalupe Ignacio Cantú Garza, al M.C. José Manuel Rocha y a todos los maestros de esta coordinación, su apoyo fue fundamental para poder realizar este trabajo.

Gracias a todos mis hermanos de Ministerios Hebrón que me apoyaron en el transcurso de este trabajo, así mismo un especial agradecimiento a mi congregación la iglesia Monte Sinai, por sus palabras de ánimo y su grande paciencia para conmigo, a mis amigos mas cercanos; la Hermana Hiyam Añorve, el Hermano Jorge Alonso, los Hermanos Mario, Israel y Melissa González, las Hermanas Daphne y Darian Gámez, el Hermano Leonel García, la Hermana Nohemi Delgado, las Hermanas Rebeca y Ana Rut Ruiz, los Hermanos Andrés y Daniel Sagaon, La Hermana Isaura Silva, y a todos

mis amigos que sin su comprensión y todas sus palabras de animo éste trabajo no hubiese sido realizado.

Gracias a Mis pastores los Hermanos Ordoñez, no sólo por guiarme a mi y a la congregación en el camino que nuestro Señor ha trazado, sino por sus palabras de ánimo, comprensión para con todos nosotros.

Gracias a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por creer en mi y en mi trabajo, por reconocer el talento que a sus estudiantes les fué otorgado por Dios.

Gracias a la Universidad Autónoma de Nuevo León por darme la oportunidad de realizar mi formación académica desde el nivel de preparatoria hasta la maestría en ésta loable institución.

Gracias al CONACYT no solo por el apoyo económico sino también por el apoyo moral recibido de su parte.

RESUMEN

Diagnóstico de fallas de sistemas operando en lazo cerrado.

Publicación No. _____

Álvaro Daniel González Yzcoa, Ing. en Electrónica y Automatización

Universidad Autónoma de Nuevo León, 2012

Profesor Asesor: Dr. Efraín Alcorta García

Muchos de los sistemas que se monitorean con el objetivo de detección e identificación de fallas (independientemente del tipo, magnitud y/o origen) se encuentran operando en lazo cerrado, esto debido a las ventajas que presentan al trabajar en lazo cerrado e.g. la robustez, el desempeño del sistema etc. Estas mismas ventajas en el control se vuelven antagónicas para el proceso de detección de fallas ya que intuitivamente el control es diseñado para atenuar el efecto de entradas desconocidas y/o perturbaciones. Esto motiva la necesidad de analizar como impacta el control en lazo cerrado al diagnóstico de fallas.

Existen una variedad de metodologías con las cuales se puede evadir el efecto de la retroalimentación en el diagnóstico de fallas, sin embargo no se hace la comparación directa entre el residuo obtenido con el sistema operando en lazo abierto y el residuo obtenido cuando el sistema opera en lazo cerrado, dejando un poco confuso el hecho que se ha evadido dicho efecto o no. Otro hecho es el que la prueba de los métodos solo es aplicada hacia fallas que son aditivas y esto deja la sensación de que no se evade dicho efecto ante las fallas multiplicativas.

En este trabajo se caracterizara el efecto de la retralimentación sobre la detectabilidad de las fallas ya sean de actuador, proceso y/o sensor, compararemos el análisis con fallas modeladas como aditivas (no-paramétricas) y modeladas como multiplicativas(paramétricas) de manera que la representación del efecto del lazo cerrado es mostrado claramente. Se propone una solución al problema de diagnóstico que permite garantizar la detección de fallas independientemente del control y lo pequeño de la

magnitud de las fallas. Así mismo, el método propuesto permite el manejo unificado de fallas aditivas y multiplicativas.

Índice General

Agradecimientos	IV
Resumen	VI
Índice General	VIII
Índice de Figuras	XI
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Motivación	5
1.3. Antecedentes técnicos	7
1.4. Formulación del problema	8
1.4.1. En espacio de estados	8
1.4.2. En función de transferencia	9
1.5. Objetivos	10
1.5.1. Objetivo General	10
1.5.2. Objetivos Particulares	10
1.6. Estructura de la tesis	10
2. Modelado de fallas	12
2.1. Introducción	12
2.2. Sistema representado en espacio de estados	13
2.2.1. Modelado de Fallas Aditivas	13
2.2.2. Modelado de Fallas Multiplicativas	15

2.3. Sistema representado en función de transferencia	16
2.3.1. Modelado de Fallas Aditivas	17
2.3.2. Modelado de Fallas Multiplicativas	19
2.4. Conclusión	20
3. Análisis del efecto del lazo de control	21
3.1. Introducción	21
3.2. Análisis en espacio de estados	21
3.2.1. Generador de residuos para fallas aditivas	21
3.2.2. Generador de residuos para fallas multiplicativas	24
3.3. En función de transferencia	26
3.3.1. Generador de residuos para fallas aditivas	28
3.3.2. Generador de residuos para fallas multiplicativas	29
3.4. Conclusión	31
4. Solución propuesta	32
4.1. Introducción	32
4.2. Primera solución propuesta	33
4.2.1. En el dominio de la frecuencia	33
4.3. Segunda solución propuesta	35
4.3.1. En el dominio de Laplace	35
4.3.2. Solución Propuesta Para Fallas Aditivas	39
4.4. Tercera solución propuesta	40
4.4.1. Método del VCL	40
4.5. Conclusión	45
5. Casos de estudio	46
5.1. Introducción	46
5.2. Circuito RLC	46
5.3. Aplicación de la primera solución propuesta	49
5.3.1. Para fallas aditivas	49
5.3.2. Para fallas multiplicativas	53
5.4. Solución # 2	57

5.4.1. Para fallas aditivas	57
5.4.2. Para fallas multiplicativas	61
5.5. Solución # 3	67
5.5.1. Para fallas aditivas	68
5.5.2. Para fallas multiplicativas	72
5.6. Conclusión	78
6. Conclusiones y Recomendaciones	79
6.1. Introducción	79
6.2. Conclusiones	79
6.3. Aportaciones	80
6.4. Trabajos Futuros	81
Bibliografía	82

Índice de figuras

1.1. Esquema de identificación de fallas <i>redundante por hardware</i>	2
1.2. Esquema básico del <i>generador de residuos</i>	4
1.3. Esquema del <i>evaluador de residuos</i>	4
1.4. Esquema de control general en <i>Lazo cerrado</i>	5
1.5. Esquema de control general en <i>Lazo cerrado</i> en conjunto con fallas.	6
1.6. Esquema de control general en <i>Lazo cerrado</i> con el sistema de diagnóstico de fallas.	6
2.1. Esquema de un sistema nominal en espacio de estados	13
2.2. Esquema de fallas aditivas en el actuador.	14
2.3. Esquema de fallas aditivas en el sensor.	15
2.4. Sistema en función de transferencia general $G_0(s)$	17
2.5. Fallas aditivas de actuador en forma general	18
2.6. Fallas aditivas de sensor en forma general	18
3.1. Sistema LTI y su diseño del observador	27
4.1. Sistema LTI en lazo cerrado	40
4.2. Sistema LTI en lazo cerrado	41
4.3. Sistema LTI en lazo cerrado incluido el control virtual	42
4.4. Sistema LTI en lazo cerrado $G_{cl}(s)$	42
4.5. Sistema LTI en lazo cerrado $G_{cl}(s)$ y su diseño del observador	43
5.1. Esquema de Circuito RLC.	47
5.2. Esquema de control general en <i>Lazo cerrado con función de transferencia</i> en conjunto con fallas.	48

5.3. Esquema de control general en <i>Lazo cerrado en variables de estado</i> en conjunto con fallas.	48
5.4. Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo abierto	50
5.5. Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo cerrado	51
5.6. Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo abierto	52
5.7. Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo cerrado	52
5.8. Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo abierto	54
5.9. Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo cerrado	54
5.10. Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo abierto	56
5.11. Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo cerrado	56
5.12. Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo abierto	58
5.13. Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo cerrado	59
5.14. Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo abierto	60
5.15. Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo cerrado	61
5.16. Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo abierto	62
5.17. Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo cerrado	63
5.18. Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo abierto	64
5.19. Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo cerrado	65
5.20. Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo abierto	66
5.21. Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo cerrado	67
5.22. Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo abierto	69
5.23. Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo cerrado	69
5.24. Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo abierto	71
5.25. Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo cerrado	71
5.26. Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo abierto	73
5.27. Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo cerrado	73
5.28. Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo abierto	75
5.29. Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo cerrado	75
5.30. Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo abierto	77
5.31. Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo cerrado	77

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

A principios de los años 70's se propone por vez primera el uso de modelos para diagnosticar **fallas**, las cuales se definen como el cambio en uno o más parámetros de un sistema dinámico, además que estas también se puede manifestar como el cambio en una entrada o salida de un sistema dinámico produciendo un cambio en la salida del sistema dinámico. Es también en este tiempo que se han desarrollado técnicas de detección de fallas basadas en modelos, los cuales tienen una relación estrecha con la teoría de control moderna.[6]

Durante los años 90's la detección de fallas basada en observadores recibió mucha atención, no sólo por la eficiencia de los observadores sino también por el hecho de poder reconstruir o estimar las variables del sistema que están o no disponibles para el cálculo de los algoritmos. [6]

El concepto de **Diagnóstico de fallas** consta de 3 tareas básicas a realizar [6]:

1. **Detección de fallas:** el tener conocimiento de que ha ocurrido una falla en cualquier parte del

sistema.

2. **Aislamiento de fallas:** el poder localizar una falla específica entre diferentes fallas.
3. **Identificación de fallas:** determinar el tipo, la magnitud y la causa de la falla ocurrida.

Los sistemas de diagnóstico de fallas se clasifican según las tareas que realizan, es decir[6]:

1. Un **FD** (Fualt Diagnosis) es un sistema de detección de fallas.
2. Un **FDI** (Fualt Diagnosis and Isolation) es un sistema de detección e identificación de fallas.
3. Un **FDIA** (Fualt Diagnosis, Isolation and analisys) es un sistema de detección e identificación y análisis de fallas.

Las técnicas generales de diagnóstico de fallas se pueden resumir a las siguientes : **Diagnóstico de fallas basado en redundancia de hardware:**

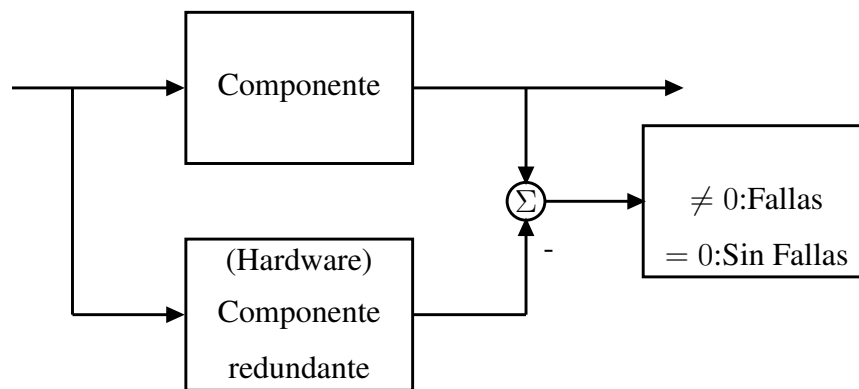


Figura 1.1: Esquema de identificación de fallas *redundante por hardware*.

La cual consiste en utilizar el mismo componente (redundante) en paralelo y si la diferencia entre el componente del sistema y el componente redundante es diferente, entonces existe una falla, de lo

contrario el sistema actúa libre de fallas. [6]

Además del uso de la redundancia por hardware se utiliza **la prueba de plausibilidad**; la cual consiste en verificar algunas leyes físicas a las cuales está sujeto el componente del proceso, una falla llevará a la pérdida de la plausibilidad; "es decir", que los valores reales obtenidos (debido a la falla) no corresponderán a los valores teóricos obtenidos con dichas leyes físicas. [6]

A partir del surgimiento del modelado de procesos, somos capaces de reproducir el comportamiento del proceso en línea, el concepto de redundancia por software, (también llamado redundancia analítica), es a grandes rasgos la combinación de la prueba de plausibilidad y la redundancia por hardware, es decir el correr un modelo matemático del proceso simultáneamente con el proceso es **Redundancia por software**. Si todas las variables reconstruidas por el modelo matemático y todas las variables medidas del proceso son idénticas, el proceso actúa libre de fallas, de ser que haya una diferencia entre ambas variables (reales del proceso y modeladas), entonces el sistema operará con fallas.

La diferencia entre las variables del sistema medidas y sus estimadas se le conoce como **Residuo**, el residuo es igual a cero si el sistema no se encuentra bajo la influencia de fallas, de lo contrario será diferente de cero, i.e., el sistema se encuentra bajo la influencia de fallas. Además, el Residuo es nuestra herramienta fundamental en el área de diagnóstico de fallas, ya que además de otorgar la información de la ocurrencia de la falla, dicha información se puede utilizar para localizar el lugar donde esta (una falla determinada) ocurrió. [6]

El proceso de crear los estimados de la salidas de interés y hacer la diferencia entre la salida de

interés real y la salida de interés estimada se conoce como **generador de residuos**, el cual se muestra de manera general como [6]:

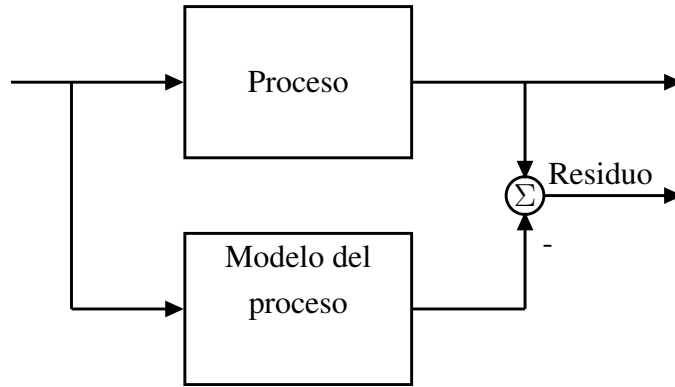


Figura 1.2: Esquema básico del *generador de residuos*.

Debido a que ningún sistema se puede modelar de forma exacta, y a la presencia de posibles perturbaciones, el mensaje del generador de residuos se vuelve corrupto, es por ello que aparte de la etapa de generador de residuos existe una segunda etapa llamada **Evaluación residual**:

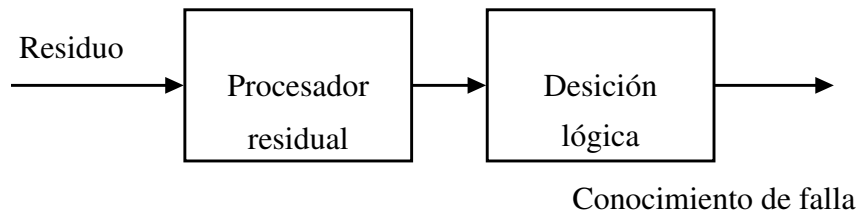


Figura 1.3: Esquema del *evaluador de residuos*.

La cual consiste en extraer la información de la falla de interés por medio de un post-proceso al residuo [6].

1.2. Motivación

En la actualidad muchos de los sistemas que son monitoreados son susceptibles a fallas ya sean en el actuador, en el proceso o en el sensor produciendo en general un comportamiento no deseado en la dinámica del sistema. Por lo tanto, es importante diagnosticar estas fallas dentro del sistema dinámico para no tener problemas, que con el tiempo pueden llegar a ser el colapso total del sistema. En la mayoría de los casos estos sistemas se encuentran operando en lazo cerrado. Como es mostrado de manera general en la figura 4.4:

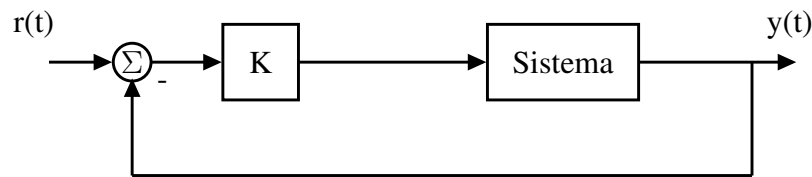


Figura 1.4: Esquema de control general en *Lazo cerrado*.

Nuestro interés es el efecto del lazo de control sobre el diagnóstico (o detección) de tales fallas (ya sean de actuador, componente o sensor, y como se hayan modelado si aditivas o multiplicativas), es decir observar si al utilizar el sistema en lazo cerrado nos genera o no un residuo atenuado o amplificado (es decir de menor o de mayor magnitud) comparado con el residuo generado en lazo abierto bajo las mismas condiciones de operación.

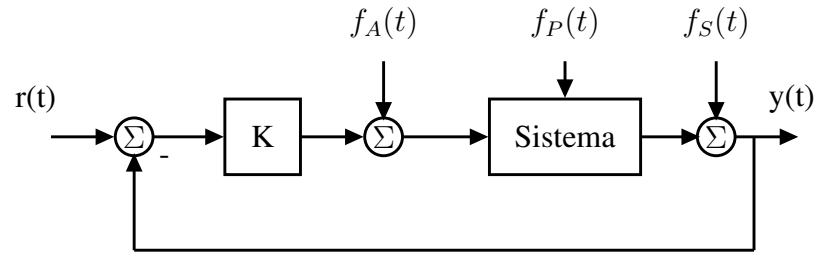


Figura 1.5: Esquema de control general en *Lazo cerrado* en conjunto con fallas.

Sin embargo, la forma en que se modelan las fallas (Capítulo 2) tendrá un efecto crucial en el efecto de lazo cerrado sobre la detección de fallas, es decir sabemos que algunos componentes de los sistemas tienden a comportarse de manera que las fallas producidos por estos se pueden modelar como aditivas o multiplicativas, dependiendo del antecedente histórico del componente en particular el cual es conocido.

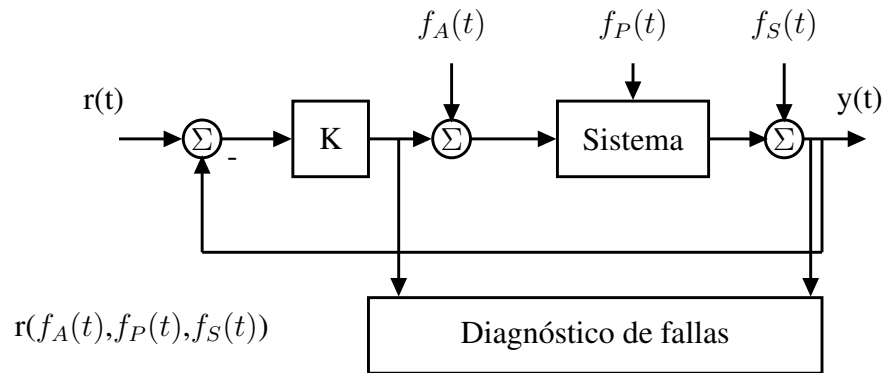


Figura 1.6: Esquema de control general en *Lazo cerrado* con el sistema de diagnóstico de fallas.

1.3. Antecedentes técnicos

Uno de los primeros trabajos considerando el tema fue [14], en donde se discute el diseño simultaneo de controlador y detector de fallas. El tema de detección en lazo cerrado es tratado de manera explícita, aun y cuando no es el tema central del trabajo. Siguiendo estas ideas, en [18] se discuten aspectos de robustez del diagnóstico de fallas frente a incertidumbre comparando el caso de lazo abierto y cerrado. Se reporta que no hay diferencia entre ambas situaciones (lazo abierto y cerrado) desde el punto de vista de diagnóstico si no hay incertidumbre. En el caso de incertidumbre se reporta la necesidad de un compromiso entre desempeño del lazo cerrado y la detección de fallas. Es importante enfatizar que los resultados son obtenidos para fallas aditivas.

Otro trabajo que considera el tema incluyendo incertidumbre y representación aditiva de fallas es [11], en donde se reporta que en ambos casos puede llegar a obtenerse el mismo desempeño si se incluye información sobre el control para el diseño del algoritmo de diagnóstico.

La consideración de fallas multiplicativas con esquemas que utilizan observadores no lineales fue realizada en [3], pero en lazo abierto. Así mismo, utilizando técnicas de optimización μ mezclada es reportado un procedimiento para el diagnóstico de fallas que considera el diseño simultaneo de control y filtro detector de fallas en [19] y [8], sin embargo, no se hace hincapié en la problemática que puede surgir. El diseño requiere que necesariamente se utilice el procedimiento simultaneo para el control y el diagnóstico. Adicionalmente, se reporta en [9] problemas para aplicar el procedimiento reportado en [8] a un circuito eléctrico simple (R-L-C).

Una solución al problema de diagnóstico de fallas multiplicativas para sistemas retroalimentados es propuesto en [13] utilizando el concepto de planitud y bajo el supuesto de disponibilidad de la salida y sus derivadas temporales, lo cual puede llegar a ser un problema para sistemas sujetos a ruido. Para el caso de métodos de diagnóstico de fallas basados en datos en [16] se muestra como la acción de control puede oscurecer el diagnóstico. Una solución basada en desigualdades lineales

matriciales fue propuesta en [12], pero solo considera fallas aditivas. En [17] se reporta una solución al problema de diagnóstico en lazo cerrado utilizando el concepto de diagnóstico activo de fallas, el cual utiliza señales auxiliares inyectadas al sistema para garantizar la detectabilidad. Un aspecto interesante es que la solución propuesta se mantiene dentro del marco lineal.

Algunos aspectos de análisis de la detectabilidad de fallas paramétricas en lazo cerrado en el dominio de la frecuencia fueron realizadas en [4]. Una idea interesante es propuesta en [15], en donde se utiliza el análisis de la señal de control para el diagnóstico. A pesar de no utilizarse el modelo en la construcción del generador de residuos, este requiere ser conocido, además, de que el procedimiento no es sistemático.

Así mismo, el problema ha sido pasado por alto frecuentemente en esquemas de control tolerante a fallas que requieren identificar la falla antes de reconfigurar el control, algunos de estos están reportados en el survey paper [20].

1.4. Formulación del problema

1.4.1. En espacio de estados

Dado un sistema LTI (Linear Time Invariant (Lineal Invariante en el Tiempo)) de la forma:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + E_d d(t) + E_f f(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) + F_d d(t) + F_f f(t), \\ u(t) &= -Kx(t) + w(t)\end{aligned}\tag{1.4.1}$$

Y el generador de residuos:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A_0 \hat{x}(t) + B_0 u(t) + LC_0(x(t) - \hat{x}(t)) \\ r(t) &= -C_0 \hat{x}(t) + y(t)\end{aligned}\tag{1.4.2}$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados del sistema, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de salida del sistema, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas al sistema, $f(t) \in \mathbb{R}^s$ es el vector de fallas aditivas y $d(t) \in \mathbb{R}^\nu$ es el vector

de perturbaciones, $r(t)$ es el vector del residuo. Además están descritas las fallas multiplicativas como cambios en los parámetros de las matrices A , B , C y D de manera que estas se pueden ver como : $A = A_0(1+\Delta\theta(t))$, $B = B_0(1+\Delta\theta(t))$, $C = C_0(1+\Delta\theta(t))$ y $D = D_0(1+\Delta\theta(t))$. Sin embargo para la realización de este trabajo la matriz D y el vector de perturbaciones $d(t)$ no serán considerados y de esta manera no se pierde la generalidad del sistema obteniendo una representación del sistema más sencilla para su análisis.

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) \\ y(t) &= C_0x(t), \\ u(t) &= -Kx(t) + w(t)\end{aligned}\tag{1.4.3}$$

Y el generador de residuos:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A_0\hat{x}(t) + B_0u(t) + LC_0(x(t) - \hat{x}(t)) \\ r(t) &= -C_0\hat{x}(t) + y(t)\end{aligned}\tag{1.4.4}$$

1.4.2. En función de transferencia

El problema se define de la siguiente manera: el determinar como es afectada la dinámica del residuo con respecto al cambio del control en lazo cerrado (comparando la dinámica del residuo cuando el sistema opera en lazo abierto y el residuo cuando el sistema opera en lazo cerrado), ante los diferentes tipos de fallas, y si es posible el poder caracterizar este efecto de manera que se contrarreste el efecto del lazo de control sobre el residuo.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Establecer una metodología de diseño de generadores de residuos para diagnóstico de fallas en sistemas lineales operando en lazo cerrado de tal forma que el efecto de cualquier falla en el generador de residuos no se vea afectada por el control en lazo cerrado.

1.5.2. Objetivos Particulares

- Cuantificar el efecto del control en lazo cerrado sobre el diagnóstico de fallas multiplicativas.
- Cuantificar el efecto del control en lazo cerrado sobre el diagnóstico de fallas aditivas.
- Propuesta de solución al problema de diagnóstico de fallas para sistemas en lazo cerrado.
- Formalización de la solución propuesta.

1.6. Estructura de la tesis

Esta tesis está constituida por 6 capítulos, los cuales se describen a continuación.

En el capítulo 1, se hace una introducción general al tema de diagnóstico de fallas, se utilizó una sección para poder analizar los antecedentes del tema propuesto (que es Diagnóstico de fallas de sistemas operando en lazo cerrado), se introduce asimismo la motivación de porque es que se desea hacer este trabajo, lo cual se debe a que al cerrar el lazo de control se puede producir tal atenuación que la detección de dicha falla no ocurra. Después se hablo un poco de los objetivos generales y particulares de este trabajo.

En el capítulo 2, se discutirá un poco la forma en que se modelan las fallas vistas en [2] y en

[6] ya sean aditivas o multiplicativas y desde la perspectiva del tiempo o de la frecuencia. En el Capítulo 3, se analiza el residuo obtenido ante las diferentes tipos de fallas (tanto de modelo como en su localización) y se generalizan dichos efectos para poder proponer una solución viable.

En el capítulo 4, se proponen 3 soluciones, desde los distintos puntos de vista, para tratar la solución del problema. En el capítulo 5, aplican los resultados propuestos a un ejemplo simulado pero con valores comerciales de resistencia, capacitancia e inductancia de manera que se observan con la evidencia lo anterior mencionado.

En el capítulo 6, se presentan las conclusiones y trabajo futuro.

Capítulo 2

Modelado de fallas

2.1. Introducción

Los diferentes tipos de fallas, ya sea de actuador, proceso y/o sensor, pueden ser modeladas de diferentes formas [6], nos avocaremos a ver el modelado de fallas desde 2 perspectivas generales; unas de ellas son no-paramétrica o aditivas, las otras son paramétricas o multiplicativas. Sin embargo el análisis se puede realizar desde la perspectiva de un sistema en la forma de variables de estado y así mismo desde la perspectiva de un sistema en función de transferencia. Debido a lo anterior se presentaran ambos análisis (en forma de espacio de estados y en forma de función de transferencia) para poder clarificar el efecto de las fallas.

Con el propósito de simplificar el análisis se considerara para nuestro análisis solamente las fallas de actuador y sensor, y omitiremos las fallas de proceso (o componente).

2.2. Sistema representado en espacio de estados

Un sistema nominal representado de manera general en variables de estado esta descrito por las ecuaciones 2.2.1

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) \\ y(t) &= C_0x(t)\end{aligned}\tag{2.2.1}$$

donde $A_0 \in R^{m \times m}$ es la matriz de distribución de estados nominales, $B_0 \in R^{m \times r}$ es la matriz de distribución de entrada nominal, $C_0 \in R^{m \times n}$ es la matriz de distribución de salida nominal, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados del sistema, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de salida del sistema y $u(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas al sistema [2]. Su representación gráfica se aprecia en la figura 2.1

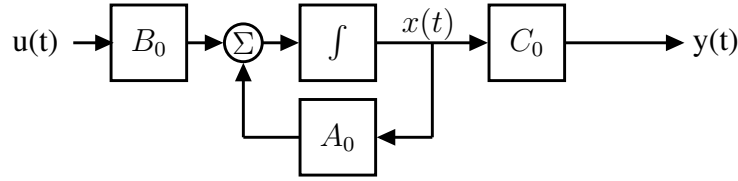


Figura 2.1: Esquema de un sistema nominal en espacio de estados

2.2.1. Modelado de Fallas Aditivas

La definición de fallas aditivas esta dada como el cambio en una de las entrada o salidas del sistema. Las fallas que se modelan como aditivas (o no-paramétricas) en espacio de estados son mostradas de manera general en las ecuaciones 2.2.2 [2]

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + Ef(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + Ff(t)\end{aligned}\tag{2.2.2}$$

donde $A_0 \in R^{m \times m}$ es la matriz de distribución de estados nominales, $B_0 \in R^{m \times r}$ es la matriz de distribución de entrada nominal, $C_0 \in R^{m \times n}$ es la matriz de distribución de salida nominal, $E \in R^{s \times s}$ es la matriz de distribución de fallas en la dinámica del sistema, $F \in R^{s \times n}$ es la matriz de distribución de fallas en la salida del sistema, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados del sistema, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de salida del sistema, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas al sistema y $f(t) \in \mathbb{R}^s$ es el vector de fallas[2].

Debido a que las fallas pueden ocurrir en el actuador, sensor y/o proceso, procedemos a separar según donde ocurren las fallas.

Fallas aditivas en el actuador y/o componente

La forma de representar las fallas aditivas que ocurren en el actuador se representan como:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0 x(t) + B_0(u(t) + f_A(t)) \\ y(t) &= C_0 x(t)\end{aligned}\tag{2.2.3}$$

Su representación gráfica:

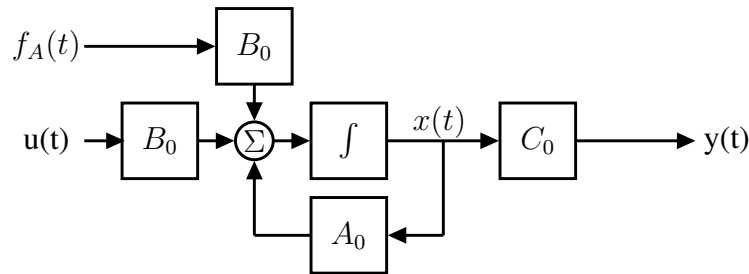


Figura 2.2: Esquema de fallas aditivas en el actuador.

Sí la falla es de componente se utiliza una matriz de distribución de fallas general llamada E .

Fallas aditivas en el sensor

Las fallas aditivas que ocurren en el sensor se representan como:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + f_S(t)\end{aligned}\tag{2.2.4}$$

Su representación gráfica:

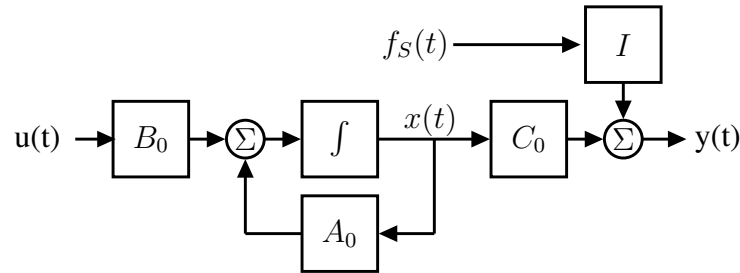


Figura 2.3: Esquema de fallas aditivas en el sensor.

donde $f_A(t) \in \mathbb{R}^s$ es el vector de fallas que ocurren en el actuador, $f_P(t) \in \mathbb{R}^s$ es el vector de fallas que ocurren en el proceso y $f_S(t) \in \mathbb{R}^s$ es el vector de fallas que ocurren en el sensor[2].

2.2.2. Modelado de Fallas Multiplicativas

Las fallas que se modelan de manera general como multiplicativas (o paramétricas) en espacio de estados se muestran en las ecuaciones 2.2.5; [2]

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + E(x(t), u(t))\Delta\theta(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + F(x(t))\Delta\theta(t)\end{aligned}\tag{2.2.5}$$

Debido a que las fallas pueden ocurrir en el actuador, sensor y/o proceso, procedemos a separar según donde ocurren las fallas.

Fallas Multiplicativas en el actuador

La forma de representar las fallas multiplicativas que ocurren en el actuador se representan como [2]:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + E(u(t))\Delta\theta_A(t) \\ y(t) &= C_0x(t)\end{aligned}\tag{2.2.6}$$

Fallas Multiplicativas en el sensor

Las fallas multiplicativas que ocurren en el sensor se representan como:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + F(x(t))\Delta\theta_S(t)\end{aligned}\tag{2.2.7}$$

donde $x(t) \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estados del sistema, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ es el vector de salida del sistema, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ es el vector de entradas al sistema [2].

2.3. Sistema representado en función de transferencia

Un sistema nominal representado en forma general en función de transferencia esta descrito por la ecuación 2.3.1

$$Y(s) = G_0(s)U(s) \quad (2.3.1)$$

la cual se representa gráficamente como el esquema de la figura 2.4

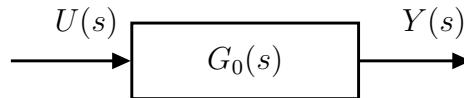


Figura 2.4: Sistema en función de transferencia general $G_0(s)$

2.3.1. Modelado de Fallas Aditivas

La definición de fallas aditivas esta dada como el cambio en una de las entrada o salidas del sistema. Las fallas que se modelan como aditivas (o no-paramétricas) en función de transferencia son mostradas de manera general en las ecuaciones siguientes; [2]

Fallas aditivas en el actuador y/o componente

Las fallas aditivas que se presentan en el actuador representadas en forma general en función de transferencia se describen en la ecuación 2.3.2

$$Y(s) = G_0(s)(U(s) + F_A(s)) \quad (2.3.2)$$

y la figura 2.5 representa la forma general de visualizarlas

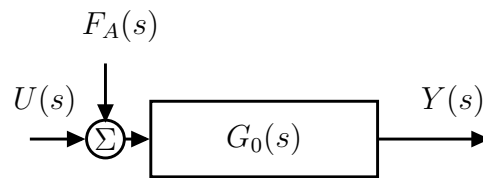


Figura 2.5: Fallas aditivas de actuador en forma general

Fallas aditivas en el sensor

Las fallas aditivas que se presentan en el sensor representadas en forma general en función de transferencia se describen en la ecuación 2.3.3

$$Y(s) = G_0(s)U(s) + F_S(s) \quad (2.3.3)$$

y la figura 2.6 representa la forma general de visualizarlas

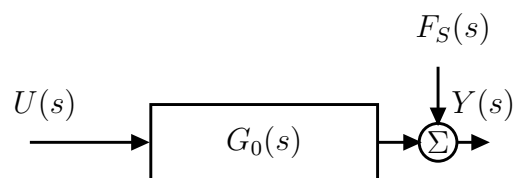


Figura 2.6: Fallas aditivas de sensor en forma general

2.3.2. Modelado de Fallas Multiplicativas

Fallas multiplicativas en el actuador

Las fallas multiplicativas que se presentan en el actuador representadas en forma general en función de transferencia se describen en la ecuación 2.3.4

$$Y(s) = G_0(s)(U(s) + F_A(s)U(s)) \quad (2.3.4)$$

Fallas multiplicativas en el sensor a)

Las fallas multiplicativas que se presentan en el sensor tipo a) (son fallas de sensor prealimentadas por la salida) representadas en forma general en función de transferencia se describen en la ecuación 2.3.5

$$Y(s) = G_0(s)U(s) + F_S(s)\bar{Y}(s) \quad (2.3.5)$$

Fallas multiplicativas en el sensor tipo b)

Las fallas multiplicativas que se presentan en el sensor b)(son fallas de sensor prealimentadas por la entrada) representadas en forma general en función de transferencia se describen en la ecuación 2.3.6

$$Y(s) = G_0(s)U(s) + F_S(s)U(s) \quad (2.3.6)$$

2.4. Conclusión

En este capítulo se puede apreciar diferentes maneras de modelar y representar las posibles fallas definidas como de actuador, o de sensor desde las dos perspectivas posibles (es decir en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia) y las dos clases posibles (es decir, aditivas o multiplicativas) que serán de gran utilidad para los análisis posteriores, y para las soluciones propuestas.

Capítulo 3

Análisis del efecto del lazo de control

3.1. Introducción

En este capítulo analizaremos que efecto se obtiene en la dinámica del residuo con cualesquier ley de control ($u = -Kx(t) + w(t)$ en el caso de un sistema en espacio de estados con control con asignación de polos , y $U(s) = C(s)(W(s) - Y(s))$ para el caso general en función de transferencia.) que sea aplicada al sistema cuando el modelo de fallas es aditivo (o no-paramétrico) y cuando el modelo de las fallas es multiplicativo (o paramétrico).

3.2. Análisis en espacio de estados

3.2.1. Generador de residuos para fallas aditivas

Si tenemos un sistema dinámico LTI de la forma:

$$\begin{aligned}
\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + E_f f(t) \\
y(t) &= C_0x(t) + F_f f(t), \\
u(t) &= -Kx(t) + w(t)
\end{aligned} \tag{3.2.1}$$

Caso de Actuador

Reescribimos la ecuación 3.2.1 para obtener el residuo producido a partir de una falla aditiva de actuador :

$$\begin{aligned}
\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + E_f f_A(t) \\
y(t) &= C_0x(t)
\end{aligned} \tag{3.2.2}$$

El residuo se calcula a partir de un observador:

$$\begin{aligned}
\dot{\hat{x}}(t) &= A_0\hat{x}(t) + B_0u(t) + LC_0(x(t) - \hat{x}(t)) \\
\dot{e}(t) &= (A_0 - LC_0)e(t) + E_f f_{A/C}(t) \\
r(t) &= C_0e(t)
\end{aligned} \tag{3.2.3}$$

La matriz función de transferencia del residuo $r(t)$, es decir $R(s)$ partiendo de la ecuación 3.2.3:

$$R(s) = \underbrace{C_0(sI - A_0 + LC_0)^{-1}E_f}_{G_{f,r}(s)} f_A(s) \tag{3.2.4}$$

Suponiendo que $E_f = B_0$ la matriz función de transferencia $R(s)$ se convierte en:

$$R(s) = \underbrace{C_0(sI - A_0 + LC_0)^{-1}B_0}_{G_{f,r}(s)} f_A(s) \tag{3.2.5}$$

En la ecuaciones 3.2.4 y 3.2.5 se observa como es que la entrada de control $U(s)$ no afecta a la transferencia que se genera de la falla al residuo. Por lo que no existe una relación entre el residuo y

la entrada de control. Esto se debe al uso del observador ya que la finalidad de usar un observador es para cancelar el efecto de la entrada en la ecuación dinámica del error y por ende en el residuo, ya que este se genera a partir de la dinámica del error.

Caso de Sensor

Un sistema dinámico que presenta fallas aditivas es modelado de manera general por la ecuación 3.2.1

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + F_f f_S(t)\end{aligned}\tag{3.2.6}$$

se genera el residuo a partir del observador:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A_0\hat{x}(t) + B_0u(t) + LC_0(x(t) - \hat{x}(t) + F_f f_S(t)) \\ \dot{e}(t) &= (A_0 - LC_0)e(t) - LF_f f_S(t) \\ r(t) &= C_0e(t) + F_f f_S(t)\end{aligned}\tag{3.2.7}$$

La matriz función de transferencia del residuo $r(t)$, es decir $R(s)$ partiendo de la ecuación 3.2.7:

$$R(s) = \underbrace{F_f f_S(s) - C_0(sI - A + LC_0)^{-1}LF_f f_S(s)}_{G_{f,r}(s)}\tag{3.2.8}$$

suponiendo que la matriz $F_f = C_0$ entonces obtenemos el residuo :

$$R(s) = \underbrace{C_0(I - (sI - A + LC_0)^{-1}LC_0)}_{G_{f,r}(s)} f_S(s)\tag{3.2.9}$$

En la ecuaciones 3.2.8 y 3.2.9 se observa como es que la entrada de control $U(s)$ no se ve reflejada en la transferencia que existe de la falla al residuo. Por lo que no existe una relación entre el residuo

y la entrada de control. Esto se debe al uso del observador ya que la finalidad de usar un observador es para cancelar el efecto de la entrada en la ecuación dinámica del error y por lo tanto en el residuo.

3.2.2. Generador de residuos para fallas multiplicativas

Caso de Actuador

Un sistema dinámico que presenta fallas modeladas como multiplicativas en actuador:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) + E(x(t), u(t))\Delta\theta_{A/C}(t) \\ y(t) &= C_0x(t)\end{aligned}\tag{3.2.10}$$

tomando en cuenta que $E(x(t), u(t)) = B_0u(t)$ y $B = B_0(1 + \Delta\theta_A(t))$. El observador y el residuo generados están descritos por:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= A_0\hat{x}(t) + B_0u(t) + L(y(t) - C_0\hat{x}(t)) \\ \dot{\hat{e}}(t) &= (A_0 - LC_0)e(t) + B_0(w(t) - Kx(t))\Delta\theta_A(t) \\ r(t) &= C_0e(t)\end{aligned}\tag{3.2.11}$$

La matriz función de transferencia de transferencia del residuo $R(s)$ esta descrita por:

$$R(s) = C_0(sI - A_0 + LC_0)^{-1}B_0(W(s) - KX(s))\Delta\theta_A(s)\tag{3.2.12}$$

y la matriz función de transferencia que determina la evolución de los estados $X(s)$ esta determinada por la ecuación:

$$X(s) = (sI - A_0 + BK)^{-1}BW(s)\tag{3.2.13}$$

por lo que la ecuación 3.2.12 se expande en:

$$R(s) = \underbrace{C_0(sI - A_0 + LC_0)^{-1}B_0(1 - K(sI - A_0 + BK)^{-1}B)}_{G_{f,r}(s)} W(s)\Delta\theta_A(s) \quad (3.2.14)$$

En la ecuación 3.2.14 se alcanza a observar que la ganancia de retroalimentación K afecta la transferencia del residuo a la falla. Sabemos que al utilizar el observador el efecto de la entrada de control es eliminado sobre la dinámica del error, sin embargo al modelar la falla como multiplicativa, esta lleva información de la entrada de una u otra manera, ya sea como la entrada misma, o el efecto de la entrada en los estados. Ahora bien en la ecuación 3.2.14 surge la interrogante, esa relación es correcta siempre y cuando se tenga un muy buen estimado de la falla, lo cual es correcto debido a la aparición de $B = B_0(1 + \Delta\theta_A(t))$, si no tenemos el valor de falla este puede provocar un error mucho mayor.

Caso de Sensor

Un sistema dinámico que presenta fallas modeladas como multiplicativas en sensor, es modelado de manera general por la ecuación :

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_0x(t) + B_0u(t) \\ y(t) &= C_0x(t) + F(x(t))\Delta\theta_S(t) \end{aligned} \quad (3.2.15)$$

tomando en cuenta que $F(x(t)) = C_0\Delta\theta$ y $C = C_0(1 + \Delta\theta_S(t))$. El observador y el residuo generados están descritos por la ecuación :

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}(t) &= A_0\hat{x}(t) + B_0u(t) + L(y(t) - C_0\hat{x}(t)) \\ r(t) &= C_0e(t) + C_0x(t)\Delta\theta_S(t) \end{aligned} \quad (3.2.16)$$

sustituyendo la entrada de control $U(s)$ y simplificando la ecuación 3.2.16 construimos la matriz función de transferencia del residuo mediante la ecuación :

$$R(s) = C_0(I - (sI - A_0 + LC_0)^{-1}LC_0)X(s)\Delta\theta_S(s) \quad (3.2.17)$$

y la matriz función de transferencia que determina la evolución de los estados $X(s)$ esta determinada por la ecuación :

$$X(s) = (sI - A_0 + B_0K)^{-1}B_0W(s) \quad (3.2.18)$$

por lo que expandiendo la ecuación 3.2.17 en :

$$R(s) = \underbrace{(C_0(I - (sI - A_0 + LC_0)^{-1}LC_0)(sI - A_0 + B_0K)^{-1}B_0)}_{G_{f,r}(s)} W(s)\Delta\theta_S(s) \quad (3.2.19)$$

En la ecuación 3.2.19 se alcanza a observar que la ganancia de retroalimentación K afecta la transferencia del residuo a la falla. Sabemos que al utilizar el observador el efecto de la entrada de control es eliminado sobre la dinámica del error, sin embargo al modelar la falla como multiplicativa, esta lleva información de la entrada de una u otra manera, ya sea como la entrada misma, o el efecto de la entrada en los estados.

3.3. En función de transferencia

Para generar el residuo primero hay que generar un observador, a variables de estado (esto puede hacerse en Matlab) y se debe confirmar que el sistema sea observable. Una vez que esto ocurra, se

diseña la ganancia del observador ubicando los polos lo mas cerca del sistema original para asegurar que los estados del observador alcancen de una manera rápida a los estados del sistema real, y una vez obtenida la ganancia L se pasa a función de transferencia de manera que se genera el observador como se muestra en la figura (3.1)

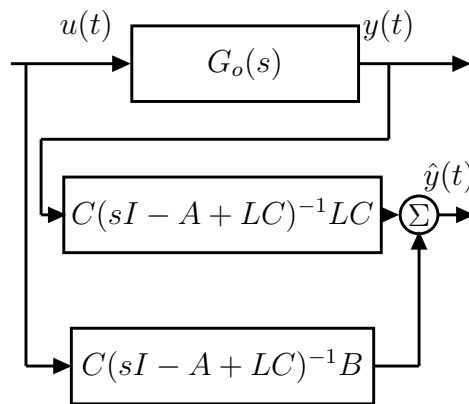


Figura 3.1: Sistema LTI y su diseño del observador

Definición del observador de salida en función de transferencia:

$$\begin{aligned} \hat{Y}(s) &= \underbrace{C(sI - A + LC)^{-1}LC}_{G_{oy}(s)} Y(s) \\ &+ \underbrace{C(sI - A + LC)^{-1}B}_{G_{ou}(s)} U(s) \end{aligned} \quad (3.3.1)$$

podemos simplificar para observar de manera mas simple el sistema de la ecaución 3.3.1 en:

$$\hat{Y}(s) = G_{oy}(s)Y(s) + G_{ou}(s)U(s) \approx Y_0(s) \quad (3.3.2)$$

debido a que se están utilizando funciones de transferencia las condiciones iniciales en para el sistema y el observador son las mismas es decir 0, ya que esta en función de transferencia, además si aplicamos el principio de superposición de efectos y cancelamos todas las posibles entradas ya sean perturbaciones o dinámicas no modeladas se cumple lo descrito por la 3.3.2.

3.3.1. Generador de residuos para fallas aditivas

Fallas en Actuador

Definición de la salida del sistema $Y(s)$

$$\begin{aligned} Y(s) &= G_o(s)(U(s) + f_A(s)) \\ Y_0(s) &= G_o(s)U(s) \end{aligned} \quad (3.3.3)$$

Definición del observador:

$$\hat{Y}(s) = G_{oy}(s)Y(s) + G_{ou}(s)U(s) \quad (3.3.4)$$

sustituyendo la ecuación 3.3.3 en la ecuación 3.3.4 y utilizando la definición 3.3.2 obtenemos :

$$\begin{aligned} \hat{Y}(s) &= G_{oy}(s)G_o(s)(U(s) + f_A(s)) + G_{ou}(s)U(s) \\ \hat{Y}(s) &= Y_0(s) + G_{oy}(s)G_o(s)f_A(s) \end{aligned} \quad (3.3.5)$$

formando el residuo como $r(s) = Y(s) - \hat{Y}(s)$ entonces:

$$r(s) = \underbrace{(I - G_{oy}(s))G_o(s)}_{G_{f,r}(s)} f_A(s) \quad (3.3.6)$$

Fallas en Sensor

Definición de la salida del sistema $Y(s)$

$$\begin{aligned} Y(s) &= G_o(s)(U(s)) + f_S(s) \\ Y_0(s) &= G_o(s)U(s) \end{aligned} \quad (3.3.7)$$

Definición del observador:

$$\hat{Y}(s) = G_{oy}(s)Y(s) + G_{ou}(s)U(s) \quad (3.3.8)$$

sustituyendo la ecuación 3.3.7 en la ecuación 3.3.8 y utilizando la definición 3.3.2 obtenemos :

$$\begin{aligned} \hat{Y}(s) &= G_{oy}(s)(G_o(s)(U(s)) + f_S(s)) + G_{ou}(s)U(s) \\ \hat{Y}(s) &= Y_0(s) + G_{oy}(s)f_S(s) \end{aligned} \quad (3.3.9)$$

formando el residuo como $r(s) = Y(s) - \hat{Y}(s)$ entonces:

$$r(s) = \underbrace{(I - G_{oy}(s))}_{G_{f,r}(s)} f_S(s) \quad (3.3.10)$$

3.3.2. Generador de residuos para fallas multiplicativas

Fallas en Actuador

Definición de la salida del sistema $Y(s)$

$$\begin{aligned} Y(s) &= G_o(s)(U(s) + \Delta\theta_A(s)U(s)) \\ Y_0(s) &= G_o(s)U(s) \end{aligned} \quad (3.3.11)$$

Definición del observador:

$$\hat{Y}(s) = G_{oy}(s)Y(s) + G_{ou}(s)U(s) \quad (3.3.12)$$

sustituyendo la ecuación 3.3.11 en la ecuación 3.3.12 y utilizando la definición 3.3.2 obtenemos :

$$\begin{aligned}\hat{Y}(s) &= G_{oy}(s)G_o(s)(U(s) + \Delta\theta_A(s)U(s)) + G_{ou}(s)U(s) \\ \hat{Y}(s) &= Y_0(s) + G_{oy}(s)G_o(s)\Delta\theta_A(s)U(s)\end{aligned}\tag{3.3.13}$$

formando el residuo como $r(s) = Y(s) - \hat{Y}(s)$ entonces:

$$r(s) = \underbrace{(I - G_{oy}(s))G_o(s)}_{G_{f,r}(s)} \Delta\theta_A(s)U(s)\tag{3.3.14}$$

Fallas en Sensor a)

Definición de la salida del sistema $Y(s)$

$$\begin{aligned}Y(s) &= G_o(s)(U(s)) + \Delta\theta_S(s)Y_0(s) \\ Y_0(s) &= G_o(s)U(s)\end{aligned}\tag{3.3.15}$$

Definición del observador:

$$\hat{Y}(s) = G_{oy}(s)Y(s) + G_{ou}(s)U(s)\tag{3.3.16}$$

sustituyendo la ecuación 3.3.15 en la ecuación 3.3.16 y utilizando la definición 3.3.2 obtenemos :

$$\begin{aligned}\hat{Y}(s) &= G_{oy}(s)(G_o(s)(U(s)) + \Delta\theta_S(s)Y_0(s)) + G_{ou}(s)U(s) \\ \hat{Y}(s) &= Y_0(s) + G_{oy}(s)\Delta\theta_S(s)Y_0(s)\end{aligned}\tag{3.3.17}$$

formando el residuo como $r(s) = Y(s) - \hat{Y}(s)$ entonces:

$$r(s) = \underbrace{(I - G_{oy}(s))}_{G_{f,r}(s)} \Delta\theta_S(s)Y_0(s)\tag{3.3.18}$$

Fallas en Sensor b)

Definición de la salida del sistema $Y(s)$

$$\begin{aligned} Y(s) &= G_o(s)(U(s)) + \Delta\theta_S(s)U(s) \\ Y_0(s) &= G_o(s)U(s) \end{aligned} \quad (3.3.19)$$

Definición del observador:

$$\hat{Y}(s) = G_{oy}(s)Y(s) + G_{ou}(s)U(s) \quad (3.3.20)$$

sustituyendo la ecuación 3.3.19 en la ecuación 3.3.20 y utilizando la definición 3.3.2 obtenemos :

$$\begin{aligned} \hat{Y}(s) &= G_{oy}(s)(G_o(s)(U(s)) + \Delta\theta_S(s)U(s)) + G_{ou}(s)U(s) \\ \hat{Y}(s) &= Y_0(s) + G_{oy}(s)\Delta\theta_S(s)U(s) \end{aligned} \quad (3.3.21)$$

formando el residuo como $r(s) = Y(s) - \hat{Y}(s)$ entonces:

$$r(s) = \underbrace{(I - G_{oy}(s))}_{G_{f,r}(s)} \Delta\theta_S(s)U(s) \quad (3.3.22)$$

3.4. Conclusión

Se puede apreciar que en las ecuaciones (3.2.5), (3.2.9) (Para las fallas aditivas), (3.2.14) y (3.2.19) (para las fallas multiplicativas) que el residuo tiene una forma general sin perdida de generalidad de $R(s) = G_{f,r}(s)f(s)$ donde $f(s)$ equivale a $f_A(s)$, $f_S(s)$, $\Delta\theta_A(s)$ o $\Delta\theta_S(s)$ respectivamente. Además, con las ecuaciones (3.2.5) y (3.2.9) para el caso de las fallas aditivas nos pudimos percatar que la ley de control no genera un efecto (ya sea de atenuación o ampliación) sobre el residuo generado. Y en las ecuaciones (3.2.14) y (3.2.19) nos pudimos dar cuenta que el efecto de la entrada de control, aunque no aparece directamente si se alcanza a apreciar su efecto sobre el residuo generado.

Capítulo 4

Solución propuesta

4.1. Introducción

En este capítulo describiremos a detalle las soluciones propuestas para ambos casos y para ambas perspectivas (en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia); es decir cuando las fallas son modeladas como aditiva y cuando la falla es modelada como multiplicativa ya sea en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia. De ante mano sabemos que el efecto del control no se manifiesta sobre el residuo cuando las fallas son aditivas, e inclusive que el residuo generado para este tipo de fallas no cambiará, sin embargo como se analizó en el capítulo anterior , y aunque no es necesario, decidí introducirlo en este trabajo también para que se muestre que el efecto del observador sobre el residuo (el cual se genera en ambos tipos de fallas representadas), puede ser cancelado mediante un post-filtro que cancele dicha dinámica, dependiendo del caso, o por operaciones aritméticas que hagan esta cancelación de dicho efecto.

4.2. Primera solución propuesta

Como observamos en el capítulo 3 todos los residuos formados se pueden expresar sin pérdida de generalidad como:

$$R(s) = G_{f,r}(s)f(s) \quad (4.2.1)$$

donde $f(s)$ equivale a $f_A(s)$, $f_S(s)$, $\Delta\theta_A(s)$ o $\Delta\theta_S(s)$ respectivamente.

La solución propuesta en forma general es aplicar un filtro después del residuo el cual cancele el efecto del observador (en el residuo) y el efecto del control (en el residuo) como se muestra en la ecuación 4.2.2

$$R_{pf}(s) = H(s)G_{f,r}^{-1}(s)G_{f,r}(s)f(s) = H(s)f(s) \quad (4.2.2)$$

con la condición de que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ sea invertible.

4.2.1. En el dominio de la frecuencia

Solución Propuesta Para Fallas Multiplicativas

Actuador:

Tomando en cuenta la ecuación (3.2.14) ($R(s) = C_0(sI - A_0 + LC_0)^{-1}B_0(1 - K(sI - A_0 + B_0K)^{-1}B_0)W(s)\Delta\theta_A(s)\Delta\theta_A(s)$) donde $G_{f,r}(s) = C_0(sI - A_0 + LC_0)^{-1}B_0(1 - K(sI - A_0 + B_0K)^{-1}B_0)W(s)\Delta\theta_A(s)$ se determina una $H(s)$ tal que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ sea invertible y el residuo

post-filtro generado es:

$$R_{pf}(s) = H(s)\Delta\theta_A(s) \quad (4.2.3)$$

Sensor:

Tomando en cuenta la ecuación (3.2.19) ($R(s) = C_0(I - (sI - A_0 + LC_0)^{-1}LC_0)(sI - A_0 + B_0K)^{-1}B_0W(s)\Delta\theta_S(s)$) donde $G_{f,r}(s) = C_0(I - (sI - A_0 + LC_0)^{-1}LC_0)(sI - A_0 + B_0K)^{-1}B_0W(s)$ se determina una $H(s)$ tal que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ sea invertible y el residuo post-filtro generado es:

$$R_{pf}(s) = H(s)\Delta\theta_S(s) \quad (4.2.4)$$

Solución Propuesta Para Fallas Aditivas

Actuador:

Tomando en cuenta la ecuación (3.2.5) ($R(s) = C_0(sI - A_0 + LC_0)^{-1}B_0f_A(s)$) donde $G_{f,r}(s) = C_0(sI - A_0 + LC_0)^{-1}B_0$ se determina una $H(s)$ tal que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ sea invertible y el residuo post-filtro generado es:

$$R_{pf}(s) = H(s)f_A(s) \quad (4.2.5)$$

Sensor:

Tomando en cuenta la ecuación (3.2.9) ($R(s) = C_0(I - (sI - A + LC_0)^{-1}LC_0)f_S(s)$) donde $G_{f,r}(s) = C_0(I - (sI - A + LC_0)^{-1}LC_0)$ se determina una $H(s)$ tal que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ sea invertible y el residuo post-filtro generado es:

$$R_{pf}(s) = H(s)f_S(s) \quad (4.2.6)$$

4.3. Segunda solución propuesta

4.3.1. En el dominio de Laplace

Solución Propuesta Para Fallas Multiplicativas

Actuador:

Tomando en cuenta la ecuación (3.3.14) ($R(s) = (I - G_{oy}(s))G_0\Delta\theta_A(s)U(s)$) donde $G_{f,r}(s) = (I - G_{oy}(s))G_0$ se determina una $H(s)$ tal que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ sea invertible y el residuo post-filtro generado es:

$$R_{pf}(s) = H(s)\Delta\theta_A(s)U(s) \quad (4.3.1)$$

Debido a la existencia de la entrada $U(s)$ en la ecuación (4.3.1) el problema no esta completamente solucionado por lo que se busca aproximarse a la entrada de control $U(s)$ aunque es completamente conocida , esta puede incluir cruces por cero o números muy cercanos a cero produciendo una división entre cero o números muy pequeños que alteren el resultado, se utiliza la entrada aproximada:

$$\begin{aligned} \text{Si } u(t) = 0 \quad \text{entonces } \bar{u}(t) &= 1 \\ \text{Si } u(t) \neq 0 \quad \text{entonces } \bar{u}(t) &= u(t) \end{aligned} \quad (4.3.2)$$

y para compensar el efecto del retardo en la entrada se utiliza un filtro (que afecte lo mínimo a la dinámica de la entrada solo que retarde la entrada para una mejor aproximación) el filtro seleccionado en caso de que el sistema sea de primer orden es:

$$F(s) = \frac{1}{s + 1} \quad (4.3.3)$$

El filtro seleccionado en caso de que el sistema sea de segundo orden es:

$$F(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \quad (4.3.4)$$

Dependiendo del orden del sistema (z) (ya que este representa el retraso en la señal de entrada $U(s)$) se utiliza el polinomio del filtro como $(s + 1)^z$. Debido a que:

$$U_r(s) = F(s)\bar{U}(s) \approx U(s) \quad (4.3.5)$$

de manera que podemos obtener a partir de las ecuaciones (4.3.1) y (4.3.5):

$$R_{pf}(s) = \frac{H(s)\Delta\theta_A(s)U(s)}{F(s)\bar{U}(s)} \approx H(s)\Delta\theta_A(s) \quad (4.3.6)$$

Sensor a):

Tomando en cuenta la ecuación (3.3.18) ($R(s) = (I - G_{oy}(s))\Delta\theta_S(s)Y_0(s)$) donde $G_{f,r}(s) =$

$(I - G_{oy}(s))$ se determina una $H(s)$ tal que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ sea invertible y el residuo post-filtro generado es:

$$R_{pf}(s) = H(s)\Delta\theta_S(s)Y_0(s) \quad (4.3.7)$$

Debido a la existencia de la entrada $Y_0(s)$ en la ecuación (4.3.7) el problema no esta completamente solucionado por lo que se busca aproximarse a la entrada de control $Y_0(s)$ aunque es completamente conocida , esta puede incluir cruces por cero o números muy cercanos a cero produciendo una división entre cero o números muy pequeños que alteren el resultado, se utiliza la entrada aproximada:

$$\begin{aligned} Si \quad y_0(t) = 0 \quad entonces \quad \bar{y}_0(t) &= 1 \\ Si \quad y_0(t) \neq 0 \quad entonces \quad \bar{y}_0(t) &= y_0(t) \end{aligned} \quad (4.3.8)$$

y para compensar el efecto del retardo en la entrada se utiliza un filtro (que afecte lo mínimo a la dinámica de la entrada solo que retarde la entrada para una mejor aproximación) el filtro seleccionado en caso de que el sistema sea de primer orden es:

$$F(s) = \frac{1}{s+1} \quad (4.3.9)$$

El filtro seleccionado en caso de que el sistema sea de segundo orden es:

$$F(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \quad (4.3.10)$$

Dependiendo del orden del sistema (z) se utiliza el polinomio característico del del filtro como $(s+1)^z$. Debido a que:

$$Y_{0r}(s) = F(s)\bar{Y}_0(s) \approx Y_0(s) \quad (4.3.11)$$

de manera que podemos a partir de las ecuaciones (4.3.7) y (4.3.11):

$$R_{pf}(s) = \frac{H(s)\Delta\theta_S(s)Y_0(s)}{F(s)\bar{Y}_0(s)} \approx H(s)\Delta\theta_S(s) \quad (4.3.12)$$

Sensor b):

Tomando en cuenta la ecuación (3.3.22) ($R(s) = (I - G_{oy}(s))\Delta\theta_S(s)U(s)$) donde $G_{f,r}(s) = (I - G_{oy}(s))$ se determina una $H(s)$ tal que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ sea invertible y el residuo post-filtro generado es:

$$R_{pf}(s) = H(s)\Delta\theta_S(s)U(s) \quad (4.3.13)$$

Debido a la existencia de la entrada $U(s)$ en la ecuación 4.3.13 el problema no esta completamente solucionado por lo que se busca aproximarse a la entrada de control $U(s)$ aunque es completamente conocida , esta puede incluir cruces por cero o números muy cercanos a cero produciendo una división entre cero o números muy pequeños que alteren el resultado, se utiliza la entrada aproximada:

$$\begin{aligned} Si \quad u(t) = 0 \quad entonces \quad \bar{u}(t) &= 1 \\ Si \quad u(t) \neq 0 \quad entonces \quad \bar{u}(t) &= u(t) \end{aligned} \quad (4.3.14)$$

y para compensar el efecto del retardo en la entrada se utiliza un filtro (que afecte lo mínimo a la dinámica de la entrada solo que retarde la entrada para una mejor aproximación) el filtro seleccionado en caso de que el sistema sea de primer orden es:

$$F(s) = \frac{1}{s+1} \quad (4.3.15)$$

El filtro seleccionado en caso de que el sistema sea de segundo orden es:

$$F(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \quad (4.3.16)$$

Dependiendo del orden del sistema (z) se utiliza el polinomio característico del del filtro como $(s+1)^z$. Por lo que:

$$U_r(s) = F(s)\bar{U}(s) \approx U(s) \quad (4.3.17)$$

de manera que podemos a partir de las ecuaciones antes descritas en (4.3.13) y (4.3.17):

$$R_{pf}(s) = \frac{H(s)\Delta\theta_S(s)U(s)}{F(s)\bar{U}(s)} \approx H(s)\Delta\theta_S(s) \quad (4.3.18)$$

4.3.2. Solución Propuesta Para Fallas Aditivas

Actuador

Tomando en cuenta la ecuación 3.3.3 ($R(s) = (I - G_{oy}(s))Go(s)f_A(s)$) donde $G_{f,r}(s) = (I - G_{oy}(s))Go(s)$ se determina una $H(s)$ tal que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ sea invertible y el residuo post-filtro generado es:

$$R_{pf}(s) = H(s)f_A(s) \quad (4.3.19)$$

Sensor

Tomando en cuenta la ecuación 3.3.10 ($R(s) = (I - G_{oy}(s))f_S(s)$) donde $G_{f,r}(s) = (I - G_{oy}(s))$ se determina una $H(s)$ tal que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ sea invertible y el residuo post-filtro generado es:

$$R_{pf}(s) = H(s)f_S(s) \quad (4.3.20)$$

Debido a que no podemos garantizar que la entrada de control $u(t)$ sea siempre diferente de cero, se propone el uso del lazo cerrado virtual provocando la diferencia entre los controladores en lazo cerrado (el virtual y el real) la cual garantiza que esta (la diferencia) nunca será cero.

4.4. Tercera solución propuesta

4.4.1. Método del VCL

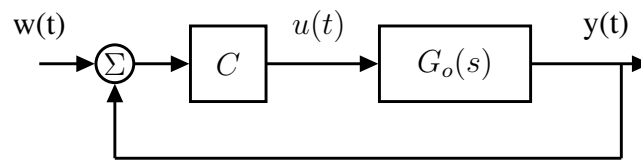


Figura 4.1: Sistema LTI en lazo cerrado

Partiendo del sistema LTI en lazo cerrado mostrado en la figura (4.1) se pueden generar mediante filtros escogidos las señales $x(t)$ y $z(t)$ como se muestra en la figura(4.2):

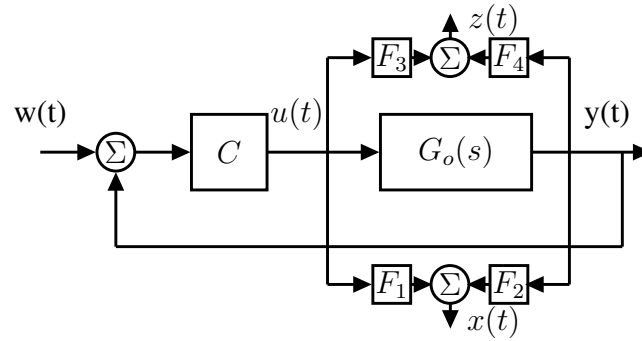


Figura 4.2: Sistema LTI en lazo cerrado

De tal manera que nuestras nuevas señales de entrada y salida sean $x(t)$ y $z(t)$ respectivamente. Donde $x(t) = F_1 u(t) + F_2 y(t)$ y $z(t) = F_3 u(t) + F_4 y(t)$, de antemano sabemos que $y(t) = G_o(s)u(t)$ y si lo sustituimos en las ecuaciones de $x(t)$ y $z(t)$ obtenemos que :

$$\begin{aligned} x(t) &= (F_1 + F_2 G_o(s))u(t) \\ z(t) &= (F_3 + F_4 G_o(s))u(t) \end{aligned}$$

donde F_1 , F_2 , F_3 y F_4 , son filtros diseñados según las especificaciones requeridas y $G_o(s)$ es la función de transferencia de lazo abierto del sistema; por lo que si queremos obtener la función de transferencia de lazo cerrado (tomando en cuenta que la salida es $z(t)$ y la entrada es $x(t)$) obtenemos que:

$$G_{cl}(s) = \frac{z(t)}{x(t)} = \frac{(F_3 + F_4 G_o(s))}{(F_1 + F_2 G_o(s))} \quad (4.4.1)$$

de manera que el sistema original se como se muestra en la figura (4.3)

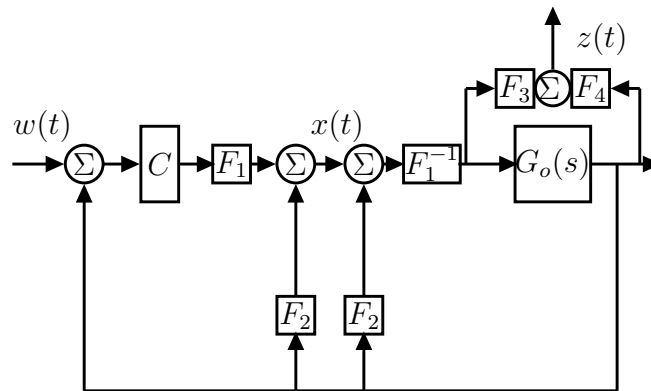


Figura 4.3: Sistema LTI en lazo cerrado incluido el control virtual

De manera que si observamos a $x(t)$ como entrada y a $z(t)$ como la salida obtenemos un sistema en lazo cerrado descrito por la ecuación (4.4.1) del cual el controlador es conocido, y podemos generar un observador en funciones de transferencia.

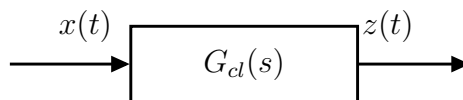


Figura 4.4: Sistema LTI en lazo cerrado $G_{cl}(s)$

Para generar el residuo antes que nada hay que generar un observador, para ello pasamos al sistema en lazo cerrado a variables de estado y se debe confirmar que el sistema sea observable de lo contrario diseñar los filtros para que esto ocurra. Una vez esto ocurra se diseña la ganancia del observador ubicando los polos lo mas cerca del sistema original para asegurar que los estados del observador alcancen de una manera rápida a los estados del sistema real, y una vez obtenida la ganancia L se pasa a función de transferencia de manera genera el observador como se muestra en la figura (4.5)

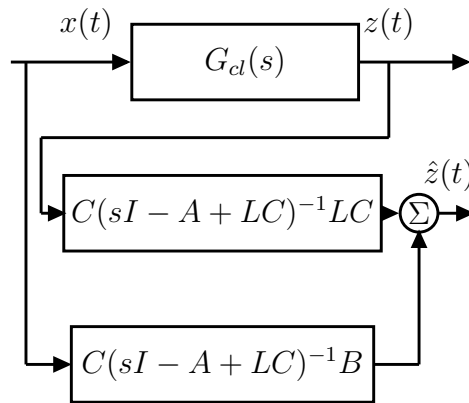


Figura 4.5: Sistema LTI en lazo cerrado $G_{cl}(s)$ y su diseño del observador

Se puede ver que la generación del observador debe hacerse con la planta nominal del sistema en la ecuación de lazo cerrado, es decir que en la ecuación (4.4.1) hay que utilizar $G_o(s) = G_{io}(s) + G_{oo}(s)\Delta\theta$ cuando $\Delta\theta = 0$; $G_o(s) = G_{io}(s)$.

El residuo se obtiene al hacer la diferencia entre la salida real $z(t)$ y la estimada por el observador $\hat{z}(t)$ es decir $r(t) = z(t) - \hat{z}(t)$.

Fallas multiplicativas en función de transferencia

La forma de modelar las fallas multiplicativas en función de transferencia es:

$$G_o(s) = G_{io}(s) + G_{oo}(s)\Delta\theta \quad (4.4.2)$$

Como se puede apreciar en la ecuación (4.4.2) la falla multiplicativa también será afectada por la

entrada $u(t)$ provocando a su vez cambios significativos en el residuo generado, aún y cuando con el control virtual en lazo cerrado cancelamos el efecto de la entrada $u(t)$ el residuo generado aún esta en función de la entrada $x(t)$, por lo que podemos no cancelar parte de su efecto de la siguiente manera:

Consideremos la figura (4.4), un sistema LTI con su entrada $x(t)$ y su salida $z(t)$, debido a que es un sistema LTI si su entrada (en este caso $x(t)$) es igual a 0, por ende su salida (en este caso $z(t)$) será también 0. Consideremos ahora la figura (3.1), la cual muestra la estructura de un sistema LTI, y el observador de salida en función de transferencia, el cual esta compuesto por funciones LTI, por lo tanto las entradas del observador (en este caso $x(t)$ y $z(t)$) son 0 entonces la salida (en este caso $\hat{z}(t)$) sera 0; por lo tanto el residuo que depende de la salida real del sistema ($z(t)$) y la estimada del observador ($\hat{z}(t)$), es decir $r(t) = z(t) - \hat{z}(t)$, si ambos ($z(t)$ y $\hat{z}(t)$) son 0 entonces el residuo ($r(t)$) sera 0, por lo que se decidió, efectuar un algoritmo de decisión que haga:

$$\begin{aligned} \text{Si } x(t) = 0 \quad \text{entonces} \quad \bar{x}(t) &= 1 \\ \text{Si } x(t) \neq 0 \quad \text{entonces} \quad \bar{x}(t) &= x(t) \end{aligned} \tag{4.4.3}$$

de manera que el residuo siempre se pueda dividir entre un número que no sea 0. Así se obtendrá:

$$r_{pf}(t) = \frac{r(t)}{\bar{x}(t)} \tag{4.4.4}$$

en principio esto es posible debido a que la señal $x(t)$ esta disponible desde un principio ya que sin ella no podríamos generar el observador; y está misma señal es la que lleva la información entre la diferencia de los controladores (el real y el virtual, el cual es propuesto por el diseñador).

4.5. Conclusión

En este capítulo pudimos realizar varias soluciones al problema que se genera al cerrar el lazo de control cuando las fallas son modeladas como aditivas y multiplicativas, el trabajo realizado trata de ayudar a la detectabilidad de dichas fallas aún tomando en cuenta la robustez del control que atenue en gran manera el efecto sobre el residuo de dicha falla.

Capítulo 5

Casos de estudio

5.1. Introducción

En este capítulo se analizará un caso de estudio mediante simulaciones con el cual se comprobará los resultados obtenidos. Es importante resaltar que el sistema se encuentra originalmente en lazo abierto, después se aplicará una ley de control en lazo cerrado y se generarán ambos residuos con el fin de poder comparar la salida medida $y(t)$, el residuo generado $r(t)$, y el residuo post-filtro $r_{pf}(t)$ en ambas situaciones, i.e. en lazo abierto y en lazo cerrado.

5.2. Circuito RLC

Las ecuaciones que rigen al sistema RLC de la figura (5.1) pueden ser obtenidas mediante el análisis de malla. La representación en espacio de estado queda:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{LC} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{LC} \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{5.2.1}$$

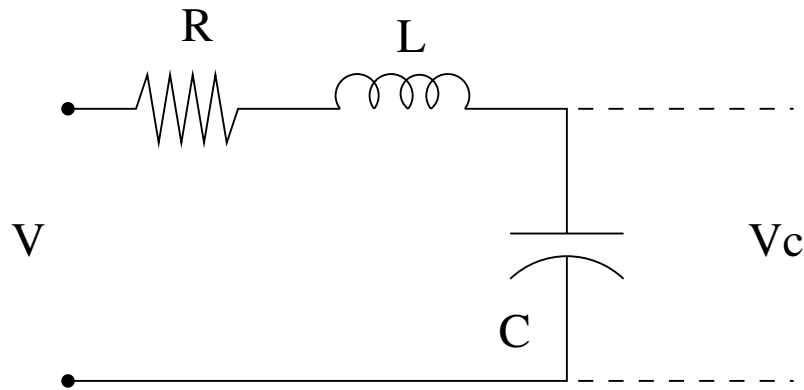


Figura 5.1: Esquema de Circuito RLC.

Se proponen los valores de $R = 2.2 \text{ Ohms}$, $C = 10000 \mu F$ y $L = 10000 \mu H$ obteniendo $\frac{1}{LC} = 10000$ y $\frac{R}{L} = 220$. Por lo que las ecuaciones de estado del sistema se re-escriben como:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -10000 & -220 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 10000 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.2.2)$$

El sistema anterior descrito también se puede representar en función de transferencia tomando en cuenta que $G_o(s) = C(sI - A)^{-1}B$ obtenemos :

$$G_o(s) = \frac{10000}{s^2 + 220s + 10000} \quad (5.2.3)$$

De la ecuación 5.2.2 y la ecuación 5.2.3 sabemos que los polos del sistema en lazo abierto están ubicados en $\{-155.81, -54.18\}$.

Se propone utilizar un controlador PI para los sistemas retroalimentados utilizando el esquema general en lazo cerrado 5.2 o el esquema general en lazo cerrado 5.3 , donde $C(s)$ representa el control PI que se encuentra en lazo cerrado con los siguientes valores de ganancias $ki = .125$ (ganancia

integral) y $k_p = 100$ (ganancia proporcional), las cuales fueron seleccionadas para que la respuesta del sistema llegase a estar en estado estable mucho antes de que la falla se de y que el tiempo de respuesta con lo anterior dicho nos permite visualizar de una mejor manera el efecto de la falla en la salida a través del residuo, $G_o(s)$ representa al sistema en función de transferencia en la ecuación 5.2.3 y $\dot{x}(t)$ al sistema en variables de estado en la ecuación 5.2.2.

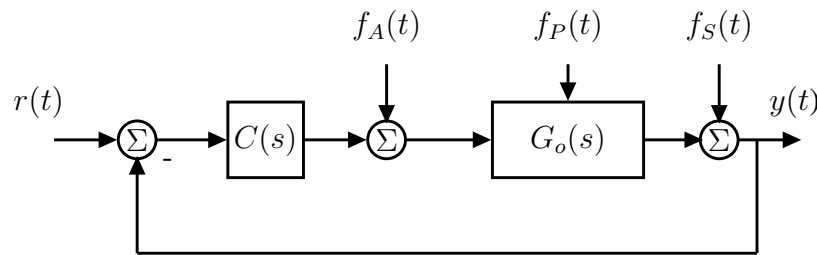


Figura 5.2: Esquema de control general en *Lazo cerrado con función de transferencia* en conjunto con fallas.

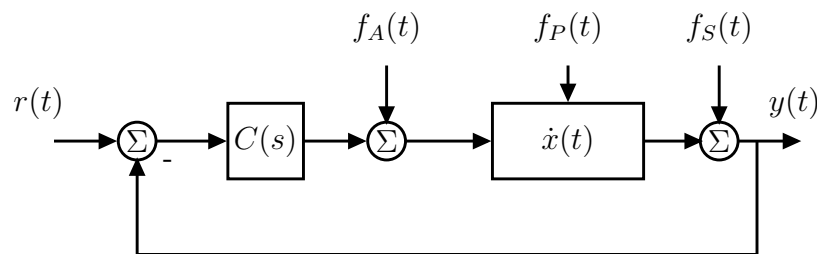


Figura 5.3: Esquema de control general en *Lazo cerrado en variables de estado* en conjunto con fallas.

El diseño del generador de residuos es simple, pues no requiere desacoplo y la ganancia se selecciona como $L = \begin{bmatrix} 29,99 \\ -159,99 \end{bmatrix}$. Ubicando los polos del observador en $\{-100, -150\}$. Se propone que $H(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1}$ (debido a que esta $H(s)$ cumple en el caso de fallas aditivas y multiplicativas con la propiedad de que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ debe ser invertible).

Con la finalidad de mostrar los resultados del trabajo se considera las fallas simuladas en cada caso como: falla aditiva en actuador $f_A(t) = 1$, falla aditiva en sensor $f_S(t) = 1$ y fallas multiplicativas $\Delta\theta_A(t) = 1$ y $\Delta\theta_S(t) = 1$, donde las fallas anteriormente propuestas ocurren en un tiempo de $t = 5 \text{ seg.}$

5.3. Aplicación de la primera solución propuesta

Se utilizan las ecuaciones (3.2.5), (3.2.9), (3.2.14) y (3.2.19) para determinar $G_{f,r}(s)$ en cada uno de los casos de esta solución.

5.3.1. Para fallas aditivas

Caso de Actuador

Considerando la ecuación 3.2.5 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 250s + 15000}{10000(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.3.1)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.3.1 al residuo obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} f_A(s) \quad (5.3.2)$$

y como se observo en el capítulo 3 los cambios en la entrada no afectan a las fallas aditivas (ya sean de actuador o sensor) por lo que el residuo original será el mismo sin importar los cambios de controladores, ya que por la teoría de observadores cancela el efecto de la entrada sobre el residuo. Lo anterior se observara en las siguientes gráficas;

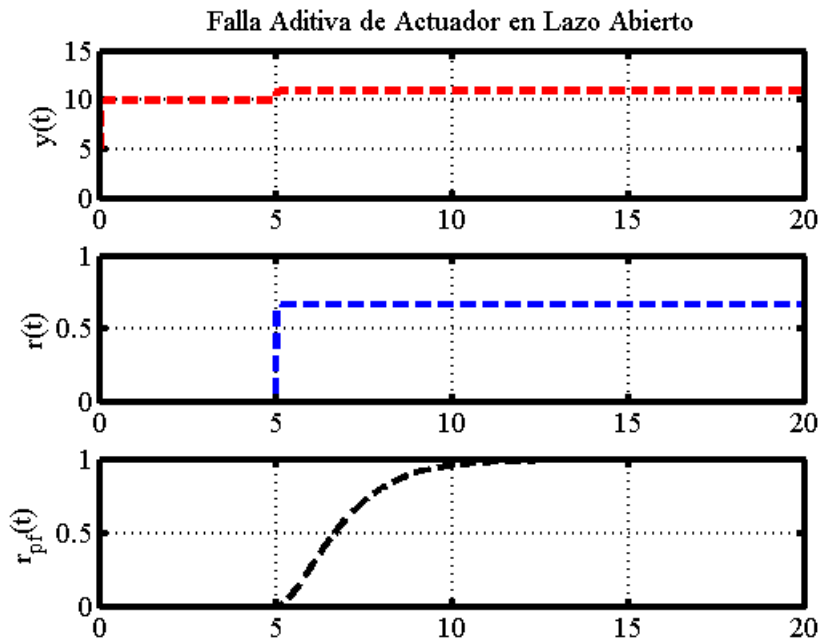


Figura 5.4: Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo abierto

En las figuras 5.4 y 5.5 donde la primer fila se gráfica la salida del sistema $y(t)$, en la segunda fila el residuo generado $r(t)$ y en la tercer fila el residuo post-filtro $r_{pf}(t)$ según el caso, podemos apreciar que el control sí genera cambios en la salida del sistema $y(t)$, sin embargo sobre el residuo $r(t)$ no es afectado, aplicandole el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ llegamos a obtener el valor final de la falla original propuesta.

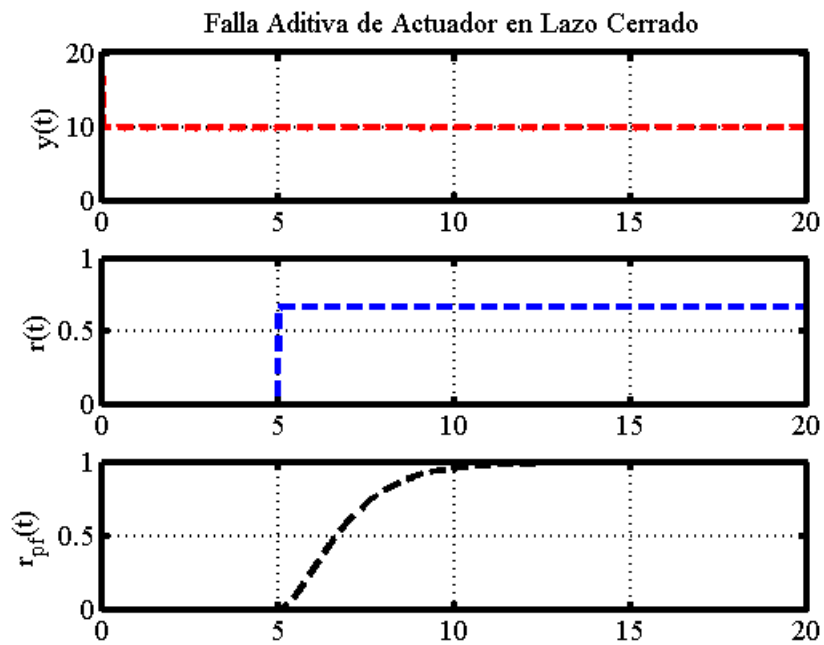


Figura 5.5: Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo cerrado

Caso de Sensor

Considerando la ecuación 3.2.9 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 250s + 15000}{(s^2 + 220s + 10000)(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.3.3)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.3.3 al residuo obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} f_S(s) \quad (5.3.4)$$

Ya que sigue siendo una falla aditiva ocurre de manera similar como en el ejemplo anterior como se observa en las siguientes gráficas;

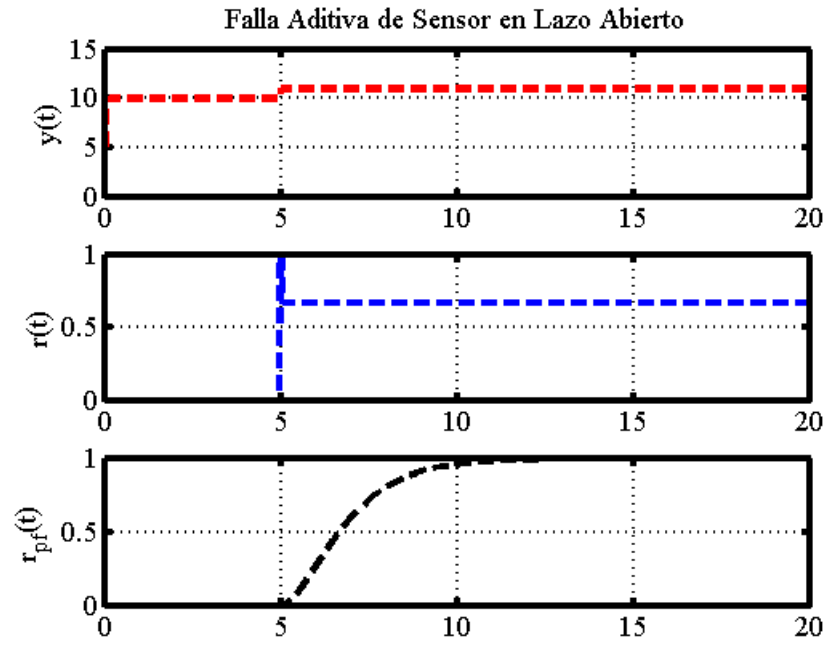


Figura 5.6: Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo abierto

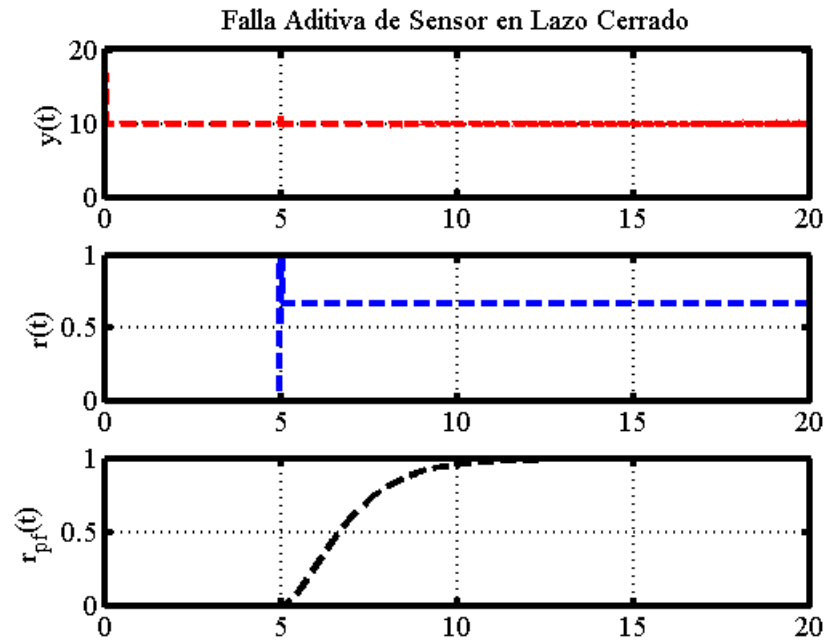


Figura 5.7: Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.6 y 5.7 donde la primer fila se gráfica la salida $y(t)$, en la segunda fila el residuo $r(t)$ y en la tercer fila el residuo después de aplicar el post-filtro $r_{pf}(t)$, apreciamos que el control sí genera cambios en la salida $y(t)$, sin embargo sobre el residuo $r(t)$ no se afecta, aplicandole el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ llegamos a obtener el valor final de la falla original.

5.3.2. Para fallas multiplicativas

Caso de Actuador

Considerando la ecuación 3.2.14 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 250s + 15000}{s^2 + 2s + 1} \quad (5.3.5)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.3.5 al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \Delta\theta_A(s)U(s) \quad (5.3.6)$$

y como se observó antes los cambios en la entrada afectan a las fallas multiplicativas por lo que el residuo cambiara según los cambios de ley de control, por lo que en esta solución se propone dividir la entrada $u(t)$ después del post-filtro . Lo anterior se observara en las siguientes gráficas;

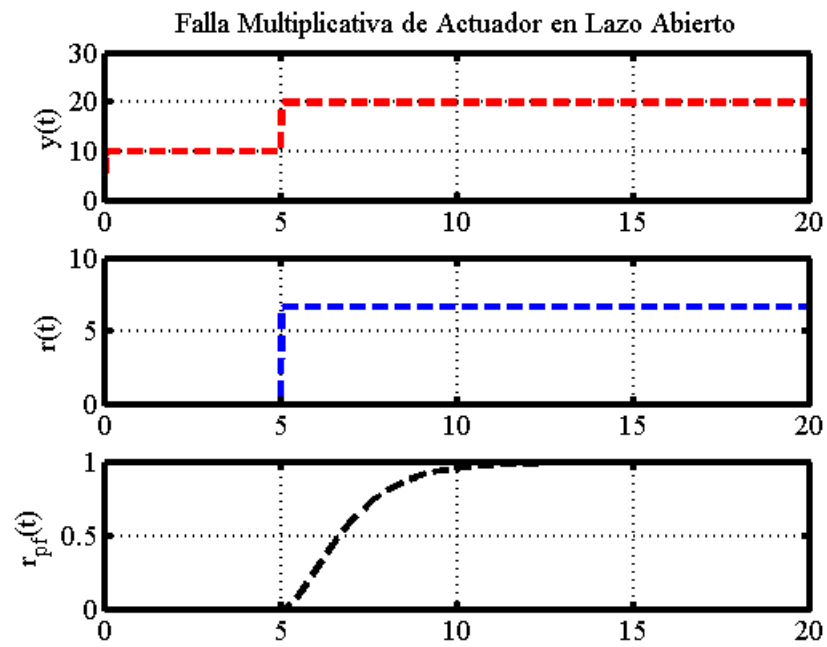


Figura 5.8: Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo abierto

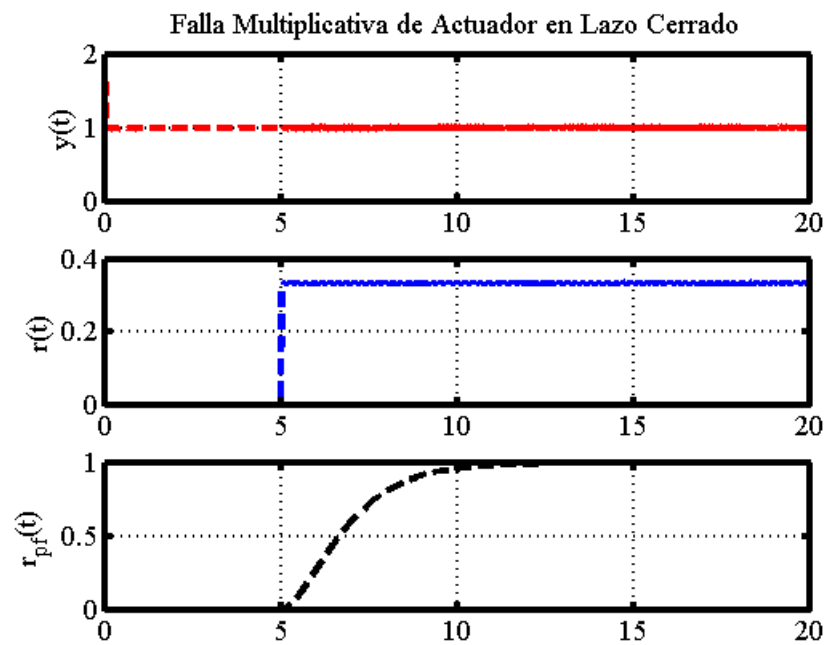


Figura 5.9: Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.8 y 5.9 donde la primer fila se gráfica la salida del sistema $y(t)$, en la segunda fila el residuo generado $r(t)$ y en la tercer fila el residuo post-filtro $r_{pf}(t)$ según el caso, podemos apreciar que el control sí genera cambios en la salida $y(t)$ y en el residuo $r(t)$, provocando un posible problema en la detección de dichas fallas así que aplicandole el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ y dividiendo el valor de la entrada (esto se debe a la forma de modelar las fallas multiplicativas) llegamos a obtener el valor de la falla que se propuso.

Caso de Sensor

Considerando la ecuación 3.2.19 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 250s + 15000}{(s^2 + 220s + 10000)(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.3.7)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.3.7 al residuo obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \Delta\theta_S(s)U(s) \quad (5.3.8)$$

se observó en el capítulo 3 que las fallas multiplicativas son afectadas por la entrada y asimismo el residuo, por lo que en esta solución se propone dividir entre la entrada $u(t)$ después del post-filtro. Lo anterior se observara en las siguientes gráficas;

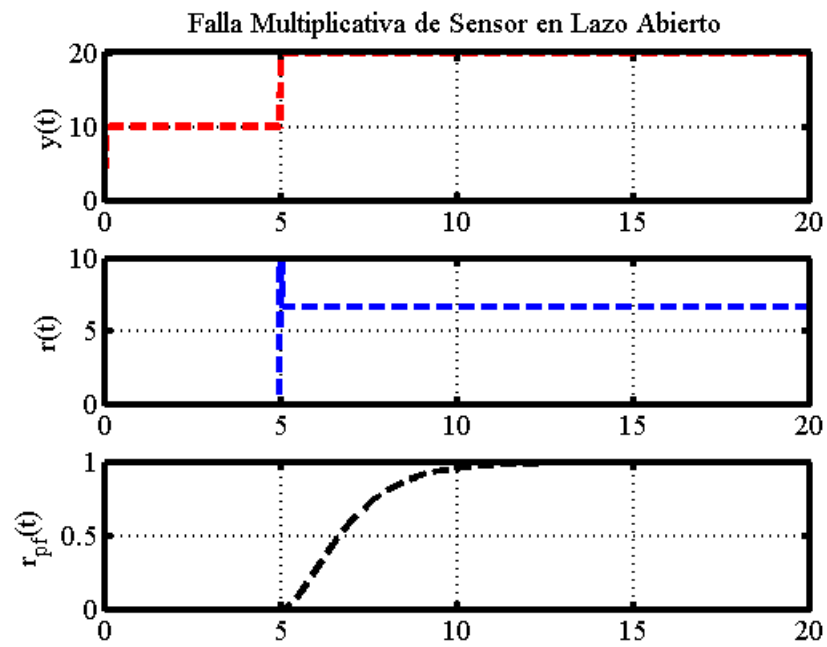


Figura 5.10: Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo abierto

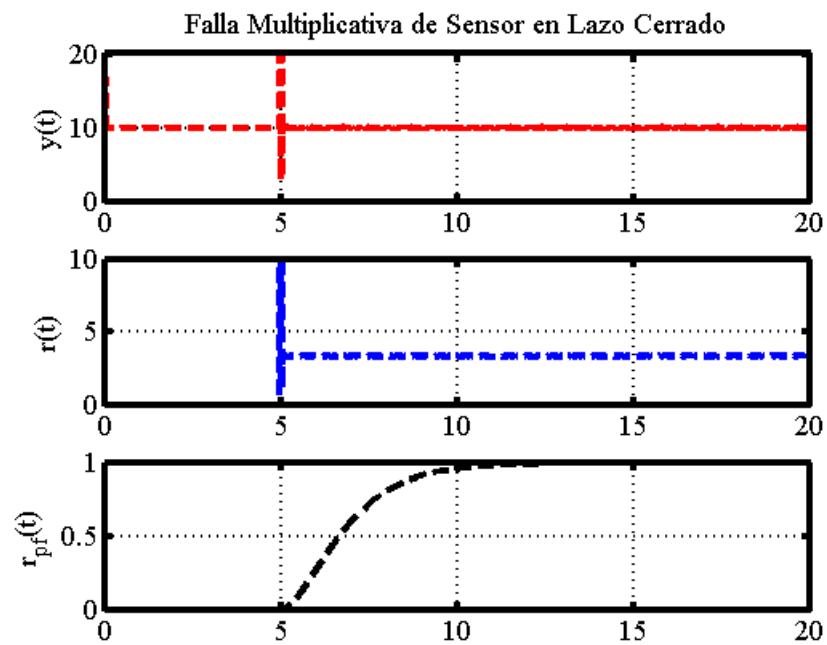


Figura 5.11: Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.10 y 5.11 donde la primer fila se gráfica la salida $y(t)$, en la segunda fila el residuo $r(t)$ y en la tercer fila el residuo después de aplicar el post-filtro $r_{pf}(t)$, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida $y(t)$ y en el residuo $r(t)$, provocando un posible problema en la detección de dichas fallas así que aplicando le el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ y dividiendo el valor de la entrada (esto se debe a la forma de modelar las fallas multiplicativas) llegamos a obtener el valor de la falla tal cual.

5.4. Solución # 2

Se utilizan las ecuaciones 3.3.6, 3.3.10, 3.3.14, 3.3.18 y 3.3.22 para determinar $G_{f,r}(s)$ en cada uno de los casos. Tomando en cuenta la ecaución 3.3.1 $G_{oy}(s) = C(sI - A + LC)^{-1}LC = \frac{29,99(s + 214,65)}{s^2 + 249.9s + 16418}$ y $G_{ou}(s) = C(sI - A + LC)^{-1}B = \frac{10000}{s^2 + 249.9s + 16418}$.

5.4.1. Para fallas aditivas

Caso de Actuador

Considerando la ecuación 3.3.6 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 249,95s + 15000}{10000(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.4.1)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.4.1 al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} f_A(s) \quad (5.4.2)$$

se observó que los cambios en la entrada no afectan a las fallas aditivas por lo que el residuo original sera el mismo sin importar los cambios de controladores, ya que por la teoría de observadores cancela el efecto de la entrada sobre el residuo. Lo anterior se observara en las siguientes gráficas;

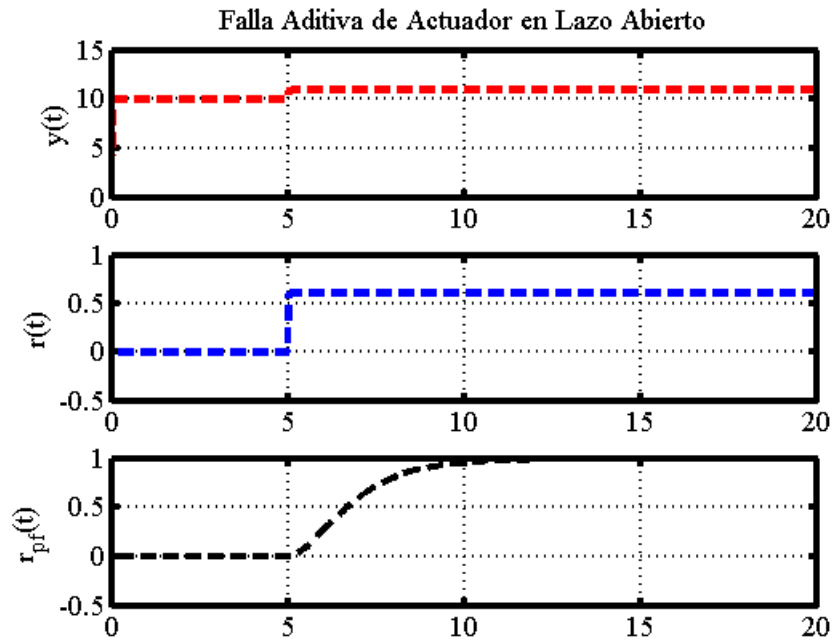


Figura 5.12: Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo abierto

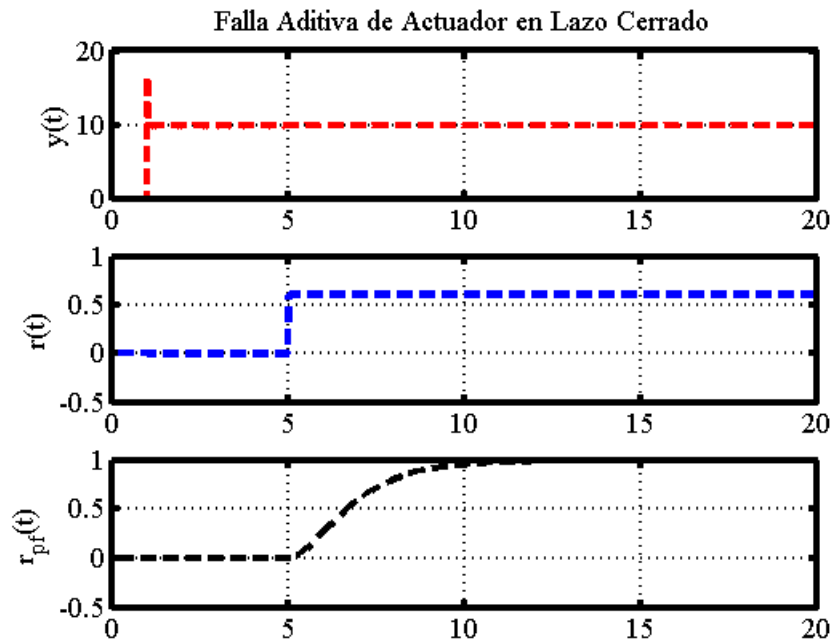


Figura 5.13: Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.12 y 5.13 donde la primera fila se grafica la salida $y(t)$, en la segunda fila el residuo $r(t)$ y en la tercera fila el residuo post-filtro $r_{pf}(t)$ de cada uno de los casos, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida del sistema $y(t)$, sin embargo sobre el residuo producido $r(t)$ no se afecta, así que al aplicar el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ llegamos a obtener el valor de la falla original.

Caso de Sensor

Considerando la ecuación 3.3.10 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 249.9s + 16418}{(s^2 + 220s + 10000)(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.4.3)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.4.3 al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} f_S(s) \quad (5.4.4)$$

se observó en el antes que los cambios en la entrada no afectan a las fallas aditivas por lo que sera el mismo sin importar los cambios en las ganancias del control. Lo anterior se observara en las siguientes gráficas;

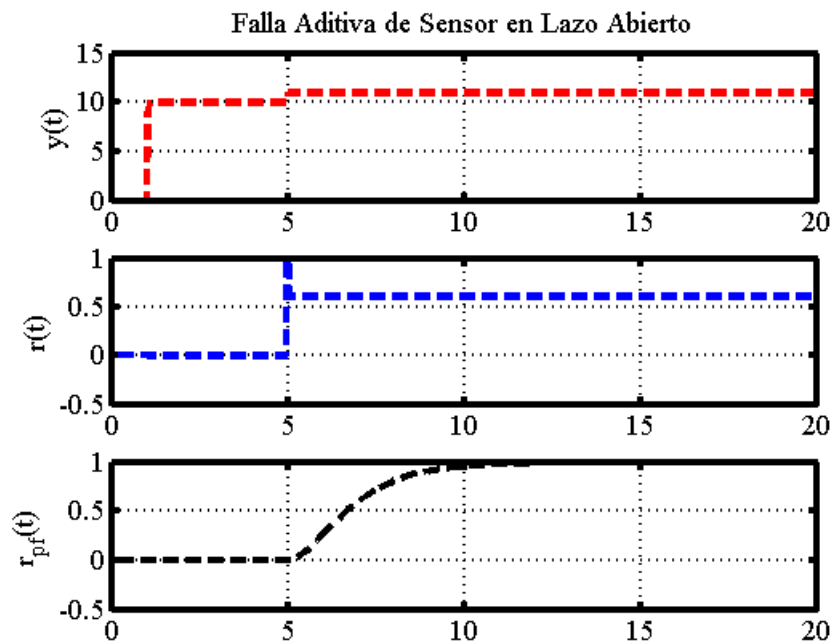


Figura 5.14: Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo abierto

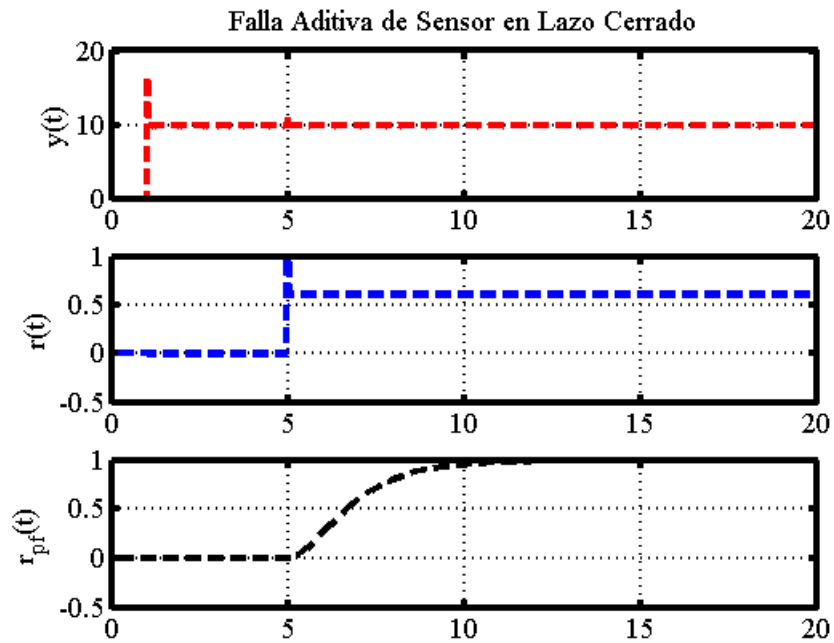


Figura 5.15: Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.14 y 5.15 donde la primer fila se gráfica la salida del sistema $y(t)$, en la segunda fila el residuo producido $r(t)$ y en la tercer fila el residuo una vez aplicado el post-filtro $r_{pf}(t)$ de cada uno de los casos, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida del sistema $y(t)$, sin embargo sobre el residuo producido $r(t)$ no se afecta, así que aplicando le el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ llegamos a obtener el valor de la falla propuesta.

5.4.2. Para fallas multiplicativas

Caso de Actuador

Considerando la ecuación 3.3.14 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 249.95s + 15000}{10000(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.4.5)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.4.5 al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \Delta\theta_A(s)U(s) \quad (5.4.6)$$

por la definición de las fallas multiplicativas mencionada en el capítulo 3 nos percatamos que la entrada genera cambios en el residuo por lo que la solución que se propone dividir entre la entrada $u(t)$ después del post-filtro . Lo anterior se observara en la siguiente gráfica;

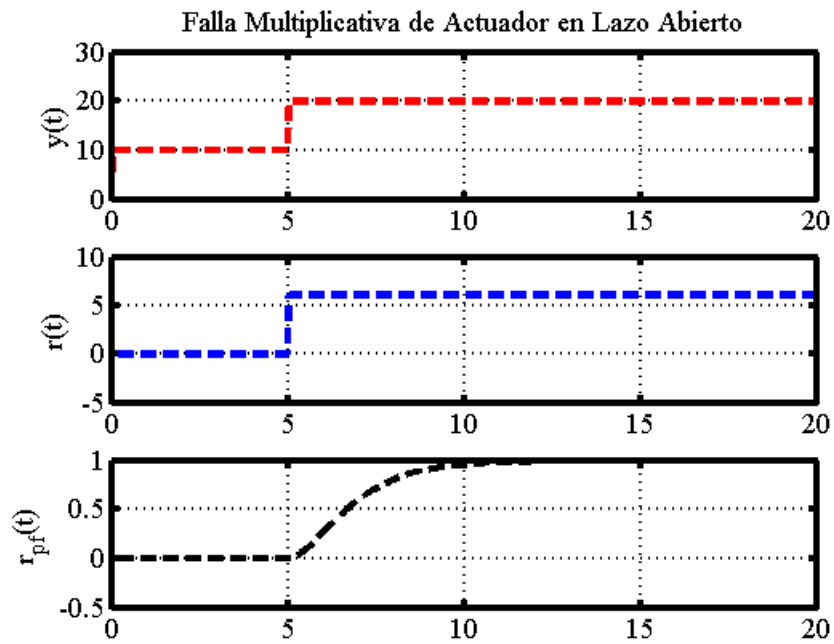


Figura 5.16: Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo abierto

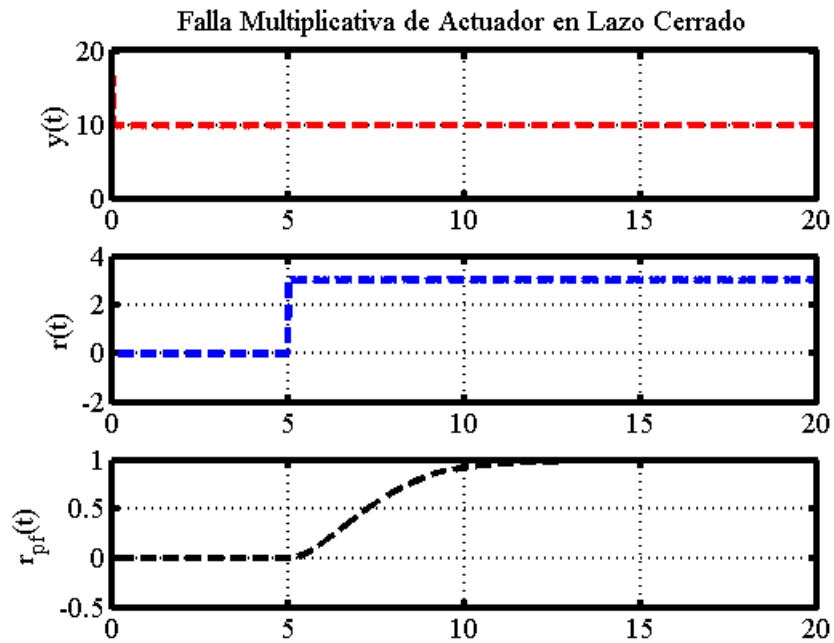


Figura 5.17: Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.16 y 5.17 donde la primer fila se gráfica la salida $y(t)$, en la segunda fila el residuo $r(t)$ y en la tercer fila el residuo post-filtro $r_{pf}(t)$ de cada uno de los casos, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida $y(t)$ y en el residuo $r(t)$, provocando un posible problema en la detección de dichas fallas así que aplicandole el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ y dividiendo el valor de la entrada (esto se debe a la forma de modelar las fallas multiplicativas) llegamos a obtener el valor de la falla.

Caso de Sensor cuando se modela multiplicando la salida $y_o(t)$

Considerando la ecuación 3.3.18 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 249.9s + 16418}{(s^2 + 220s + 10000)(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.4.7)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.4.7 al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \Delta\theta_S(s) Y_0(s) \quad (5.4.8)$$

se observó en el capítulo 3 los cambios en la entrada afectan a las fallas multiplicativas por lo que el residuo cambiara según los cambios de controladores, por lo que en esta solución se propone dividir entre la entrada $y_0(t)$ después del post-filtro . Lo anterior se observara en las siguientes gráficas;

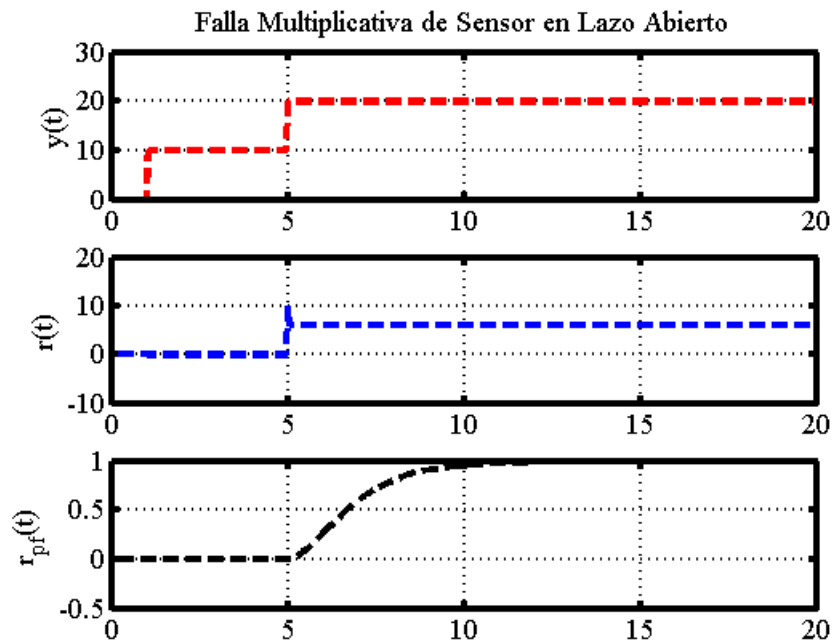


Figura 5.18: Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo abierto

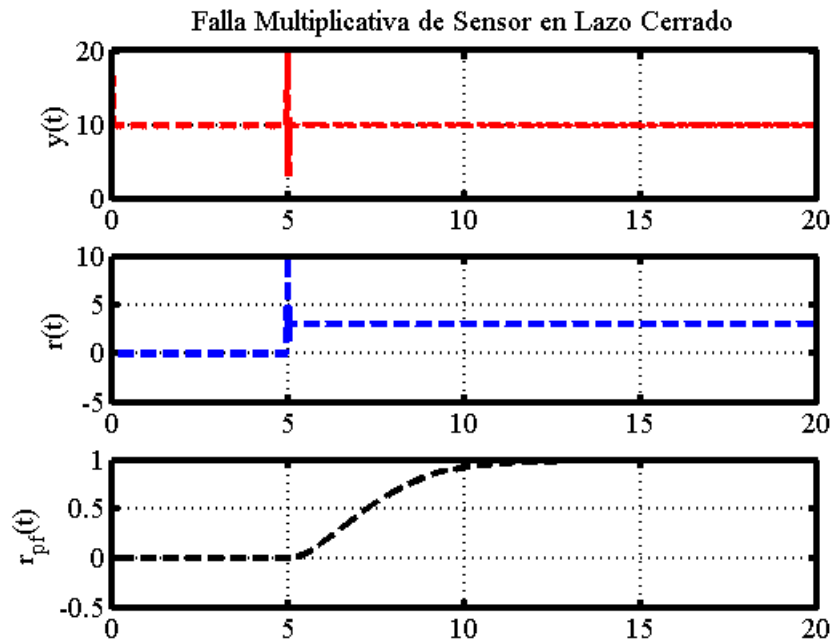


Figura 5.19: Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.18 y 5.19 donde la primera fila se grafica la salida $y(t)$, en la segunda fila el residuo $r(t)$ y en la tercera fila el residuo post-filtro $r_{pf}(t)$, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida $y(t)$ y en el residuo $r(t)$, provocando un posible problema en la detección de dichas fallas así que aplicando el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ y dividiendo el valor de la salida del sistema $y_0(t)$ (esto se debe a la forma de modelar las fallas multiplicativas) llegamos a obtener el valor de la falla.

Caso de Sensor cuando se modela multiplicando la entrada $u(t)$

Considerando la ecuación 3.3.22 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 249.9s + 16418}{(s^2 + 220s + 10000)(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.4.9)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.4.9 al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \Delta\theta_S(s) \bar{Y}(s) \quad (5.4.10)$$

Nos dimos cuenta antes que los cambios en la entrada afectan a las fallas multiplicativas por lo que el residuo cambiara según los cambios de controladores, por lo que en esta solución se propone dividir entre la entrada $u(t)$ después del post-filtro . Lo anterior se observara en la siguiente gráfica;

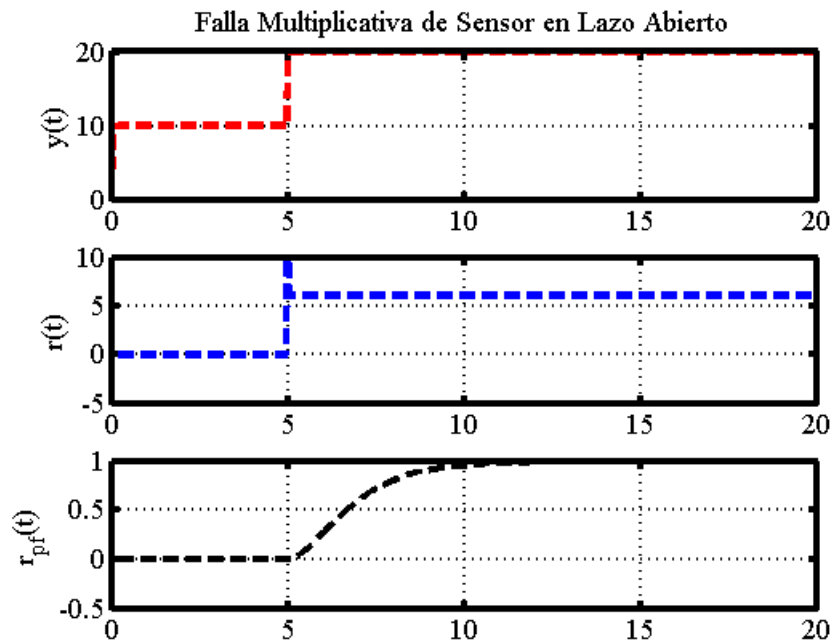


Figura 5.20: Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo abierto

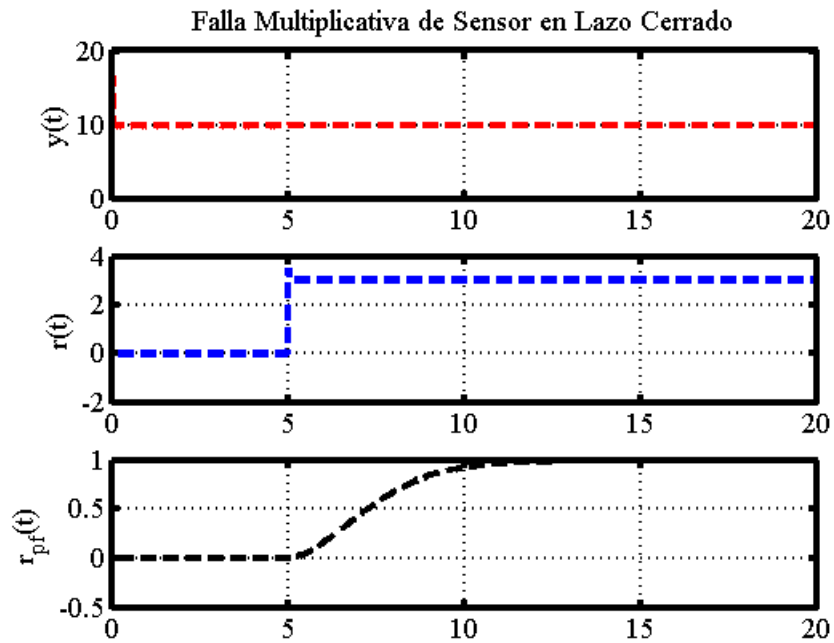


Figura 5.21: Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.20 y 5.21 donde la primer fila se gráfica la salida $y(t)$, en la segunda fila el residuo $r(t)$ y en la tercer fila el residuo después del post-filtro $r_{pf}(t)$, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida $y(t)$ y en el residuo $r(t)$, provocando un posible problema en la detección de dichas fallas así que aplicando le el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ y dividiendo el valor de la entrada (esto se debe a la forma de modelar las fallas multiplicativas) llegamos a obtener el valor de la falla original.

5.5. Solución # 3

Utilizando el método del VCL (Lazo cerrado virtual) y considerando la ecuación 4.4.1 para elegir los filtros que generen el lazo cerrado virtual. Se eligen de la siguiente manera; $f_1 = 1$, $f_2 = \frac{s^2 + 220s + 10000}{10000(s^2 + 7s + 10)}$, $f_3 = 0$ y $f_4 = \frac{s^2 + 220s + 10000}{10000(s^2 + 7s + 10)}$ de manera que el sistema en lazo cerrado obtenido es:

$$G_{cl}(s) = \frac{z(t)}{x(t)} = \frac{1}{(s^2 + 7s + 11)} \quad (5.5.1)$$

Se busca ubicar los polos del observador en $\{-16, -10\}$, obteniendo las ganancias del observador del sistema en lazo cerrado $L = \{15,999, 19\}$ y utilizando las ecuaciones de la figura 3.1 obtenemos que $G_{oy}(s) = C(sI - A + LC)^{-1}LC = \frac{19s + 149}{s^2 + 26s + 160}$ y $G_{ou}(s) = C(sI - A + LC)^{-1}B = \frac{1}{s^2 + 26s + 160}$. Se propone que $H(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1}$ (debido a que esta $H(s)$ cumple en el caso de fallas aditivas y multiplicativas con la propiedad de que $H^{-1}(s)G_{f,r}(s)$ debe ser invertible).

5.5.1. Para fallas aditivas

Caso de Actuador

Considerando la ecuación 3.3.6 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 26s + 160}{s^2 + 2s + 1} \quad (5.5.2)$$

aplicando el filtro de la ecuación ?? al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} f_A(s) \quad (5.5.3)$$

antes fue mencionado que los cambios en la entrada no afectan a las fallas aditivas por lo que el residuo original sera el mismo sin importar los cambios de controladores, ya que por la teoría de observadores cancela el efecto de la entrada sobre el residuo. Lo anterior se observara en la siguiente gráfica;

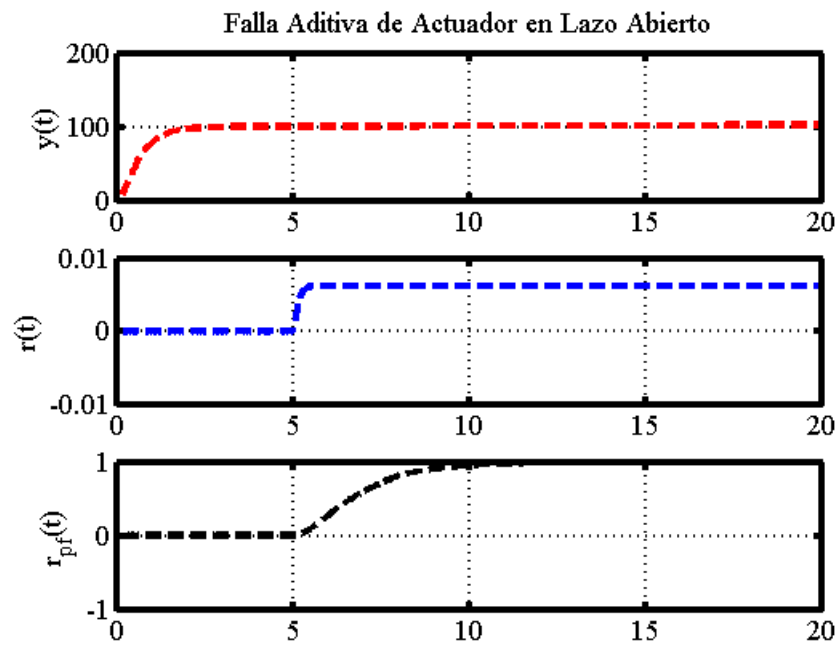


Figura 5.22: Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo abierto

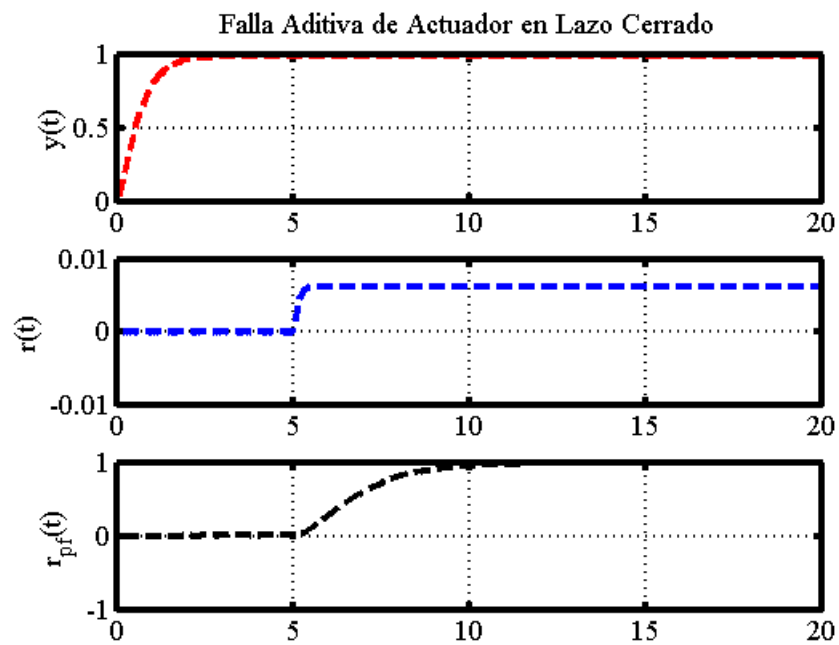


Figura 5.23: Falla aditiva de actuador en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.22 y 5.23 donde la primer fila se gráfica la salida $y(t)$, en la segunda fila el residuo $r(t)$ y en la tercer fila el residuo post-filtro $r_{pf}(t)$ de cada uno de los casos, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida $y(t)$, sin embargo sobre el residuo $r(t)$ no, así que aplicandole el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ llegamos a obtener el valor de la falla.

Caso de Sensor

Considerando la ecuación 3.3.10 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 26s + 160}{(s^2 + 7s + 10)(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.5.4)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.5.4 al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} f_S(s) \quad (5.5.5)$$

en el capítulo 3 se menciona los cambios en la entrada no afectan a las fallas aditivas por lo que el residuo original sera el mismo sin importar los cambios de controladores, ya que por la teoría de observadores cancela el efecto de la entrada sobre el residuo. Lo anterior se observara en la siguiente gráfica;

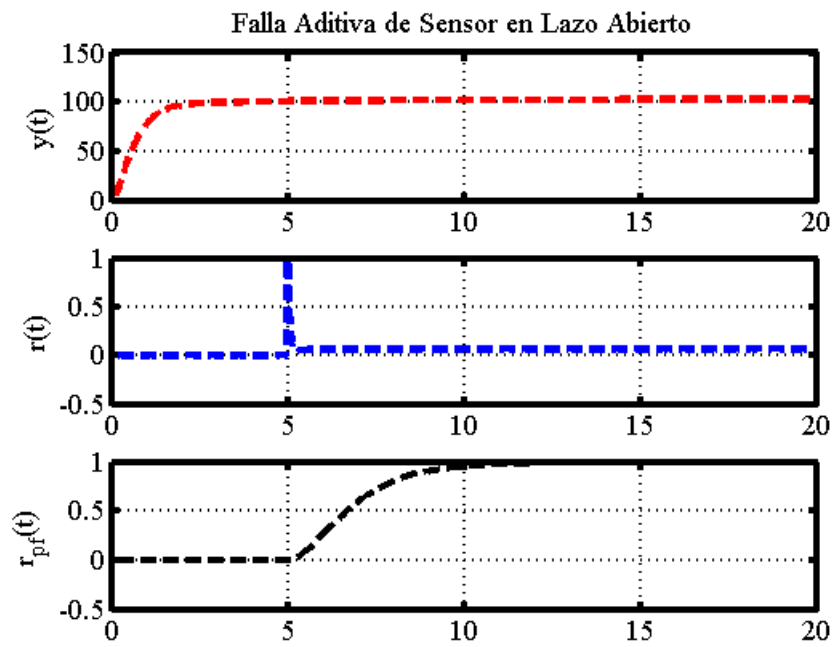


Figura 5.24: Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo abierto

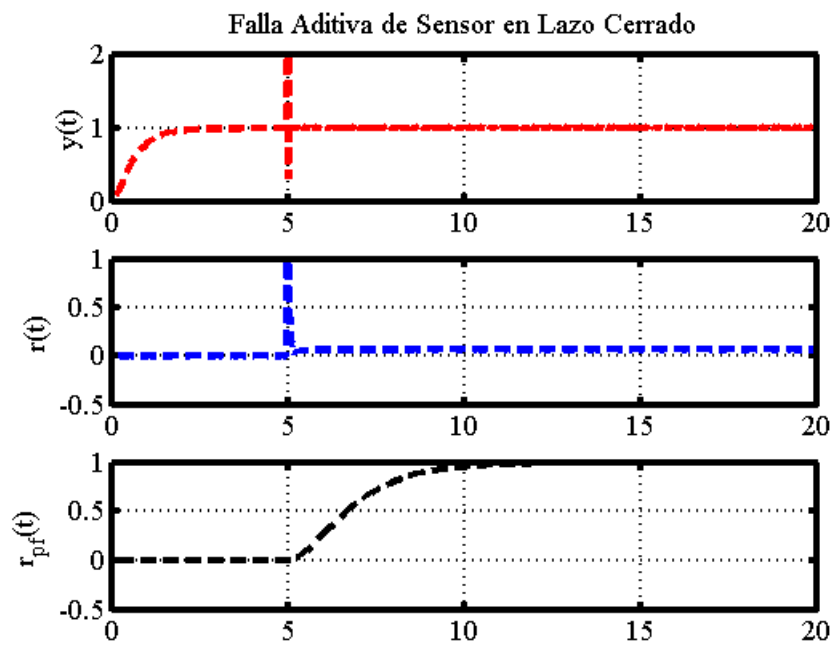


Figura 5.25: Falla aditiva de sensor en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.24 y 5.25 donde la primer fila se gráfica la salida del sistema $y(t)$, en la segunda fila el residuo producido $r(t)$ y en la tercer fila el residuo una vez aplicado el post-filtro $r_{pf}(t)$ de cada uno de los casos, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida del sistema $y(t)$, sin embargo sobre el residuo producido $r(t)$ no se afecta, así que aplicando le el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ llegamos a obtener el valor de la falla propuesta.

5.5.2. Para fallas multiplicativas

Caso de Actuador

Considerando la ecuación 3.3.14 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 26s + 160}{(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.5.6)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.5.6 al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \Delta\theta_A(s)U(s) \quad (5.5.7)$$

sabemos que los cambios en la entrada afectan a las fallas multiplicativas por lo que el residuo cambiara según los cambios de controladores, por lo que en esta solución se propone dividir entre la entrada $u(t)$ después del post-filtro . Lo anterior se observara en la siguiente gráfica;

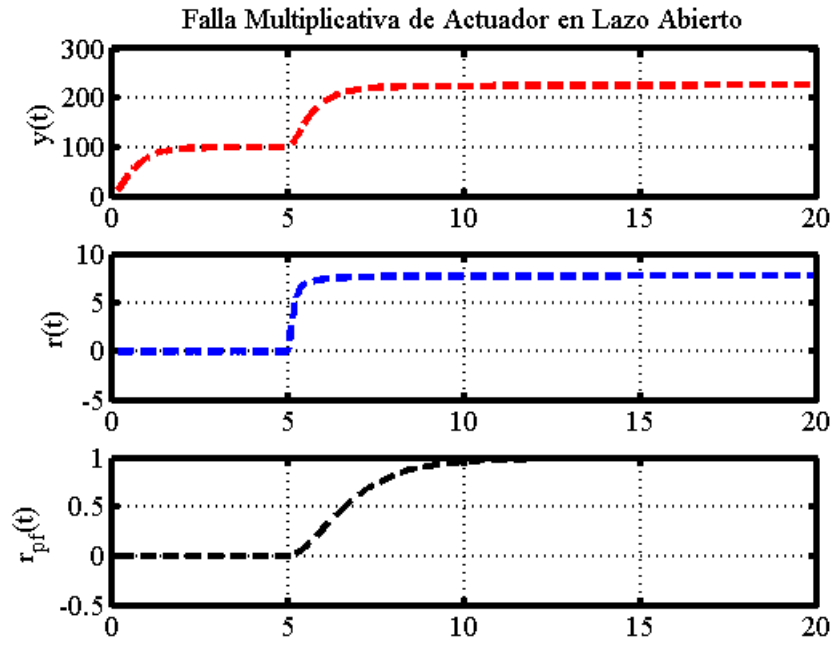


Figura 5.26: Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo abierto

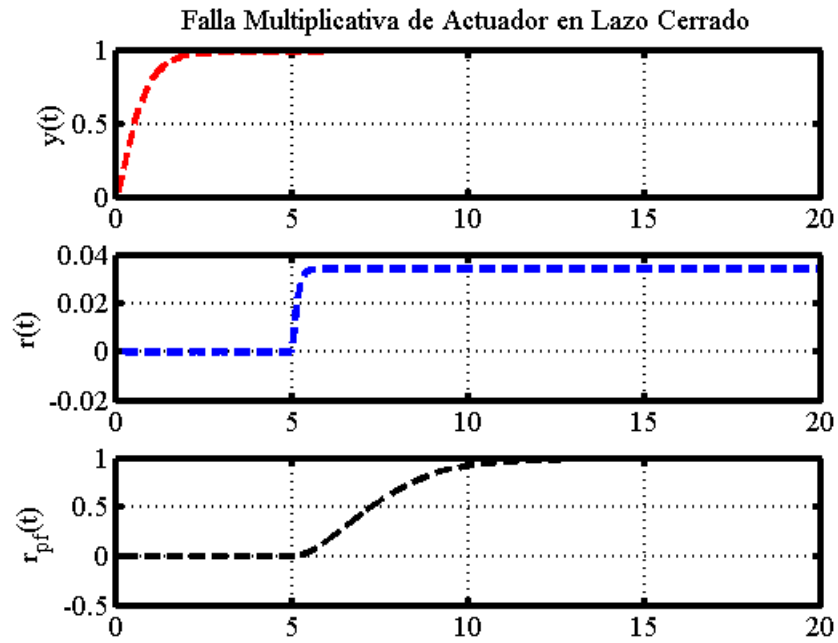


Figura 5.27: Falla multiplicativa de actuador en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.26 y 5.27 donde la primer fila se gráfica la salida $y(t)$, en la segunda fila el residuo $r(t)$ y en la tercer fila el residuo post-filtro $r_{pf}(t)$ de cada uno de los casos, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida $y(t)$ y en el residuo $r(t)$, provocando un posible problema en la detección de dichas fallas así que aplicando le el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ y dividiendo el valor de la entrada (esto se debe a la forma de modelar las fallas multiplicativas) llegamos a obtener el valor de la falla.

Caso de Sensor cuando se modela multiplicando la salida $y_o(t)$

Considerando la ecuación 3.3.18 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 26s + 160}{(s^2 + 7s + 10)(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.5.8)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.5.8 al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \Delta\theta_S(s)Y_0(s) \quad (5.5.9)$$

como se observó en el capítulo 3 los cambios en la entrada afectan a las fallas multiplicativas por lo que el residuo cambiara según los cambios de controladores, por lo que en esta solución se propone dividir entre la entrada $y_0(t)$ después del post-filtro. Lo anterior se observara en la siguiente gráfica;

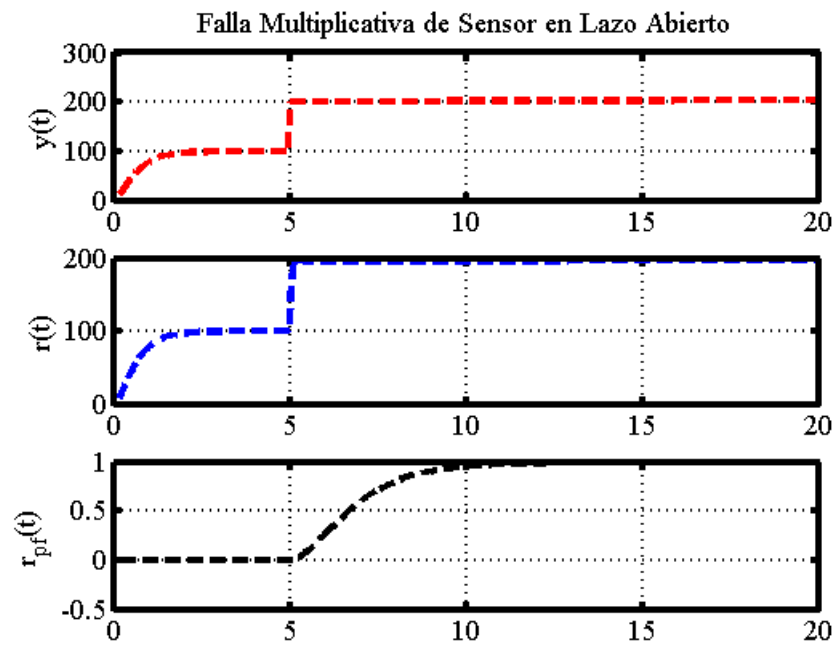


Figura 5.28: Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo abierto

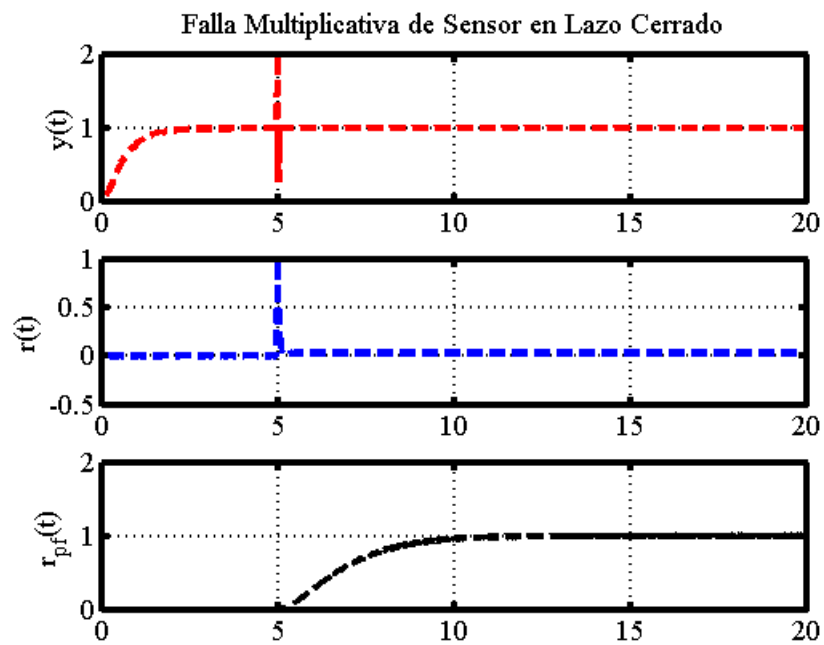


Figura 5.29: Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.28 y 5.29 donde la primer fila se gráfica la salida $y(t)$, en la segunda fila el residuo $r(t)$ y en la tercer fila el residuo post-filtro $r_{pf}(t)$, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida $y(t)$ y en el residuo $r(t)$, provocando un posible problema en la detección de dichas fallas así que aplicando le el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ y dividiendo el valor de la salida del sistema $y_0(t)$ (esto se debe a la forma de modelar las fallas multiplicativas) llegamos a obtener el valor de la falla.

Caso de Sensor cuando se modela multiplicando la entrada $u(t)$

Considerando la ecuación 3.3.22 y $H(s)$ obtenemos que $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$:

$$H(s)G_{f,r}^{-1}(s) = \frac{s^2 + 26s + 160}{(s^2 + 7s + 10)(s^2 + 2s + 1)} \quad (5.5.10)$$

aplicando el filtro de la ecuación 5.5.10 al residuo obtenido obtenemos que:

$$r_{pf}(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \Delta\theta_S(s)U(s) \quad (5.5.11)$$

como se observó en el capítulo 3 los cambios en la entrada afectan a las fallas multiplicativas por lo que el residuo cambiara según los cambios de controladores, por lo que en esta solución se propone dividir entre la entrada $u(t)$ después del post-filtro . Lo anterior se observara en la siguiente gráfica;

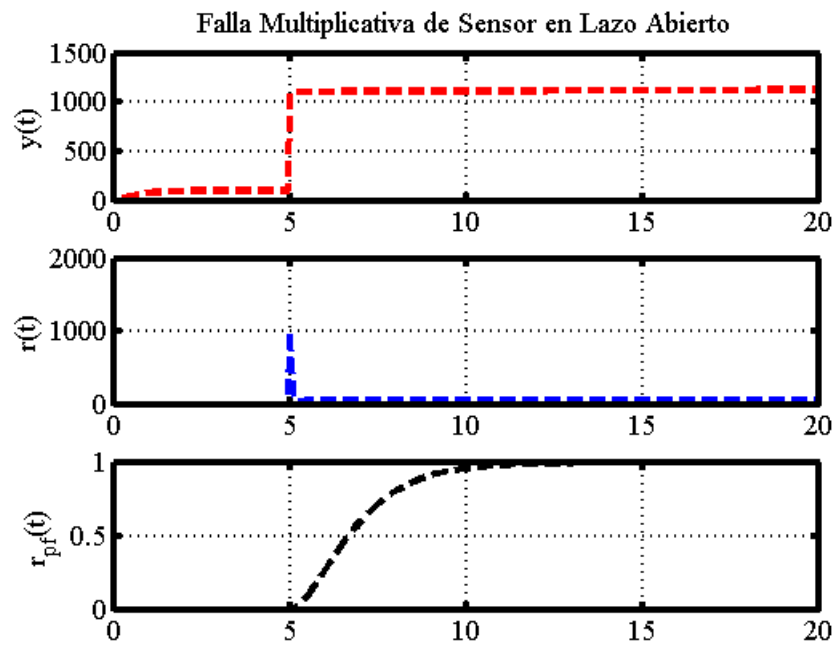


Figura 5.30: Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo abierto

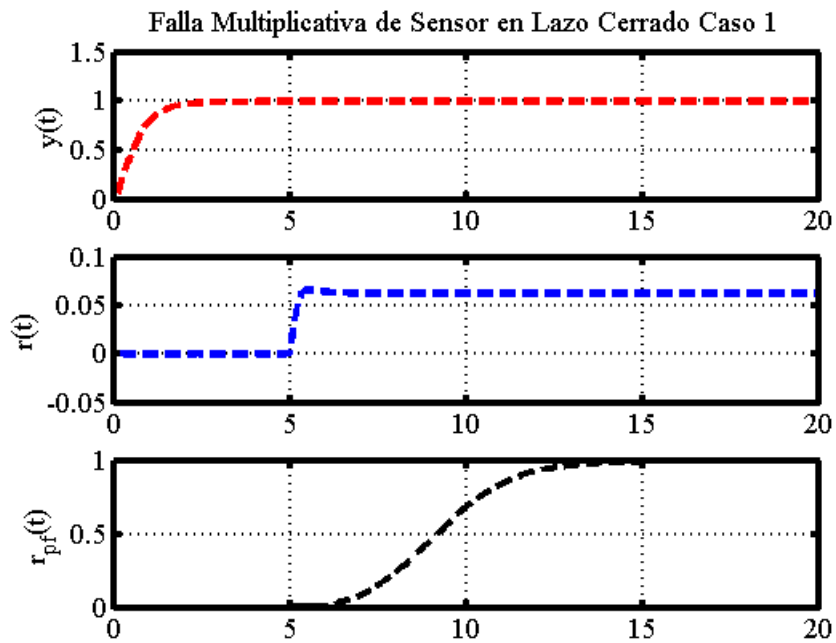


Figura 5.31: Falla multiplicativa de sensor en sistema operando en lazo cerrado

En las figuras 5.30 y 5.31 donde la primer fila se gráfica la salida $y(t)$, en la segunda fila el residuo $r(t)$ y en la tercer fila el residuo después del post-filtro $r_{pf}(t)$, podemos apreciar que el control si genera cambios en la salida $y(t)$ y en el residuo $r(t)$, provocando un posible problema en la detección de dichas fallas así que aplicando le el filtro $H(s)G_{f,r}^{-1}(s)$ y dividiendo el valor de la entrada (esto se debe a la forma de modelar las fallas multiplicativas) llegamos a obtener el valor de la falla propuesta.

5.6. Conclusión

Con este ejemplo con valores reales de resistencia, inductancia y capacitancia, se puede constatar que la transferencia del residuo a la falla es calculada de manera correcta además que tiene aplicación en el área de los sistemas LTI, además se demostró la efectividad del post-filtro utilizado en los 3 esquemas antes mencionados el cual genera que la entrada de control (cuales quiera que se utiliza) no afecta la detectabilidad de las fallas según el modelo utilizado, asegurando el uso de controladores más sofisticados sin comprometer la robustez del mismo con el generador de residuos.

Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Introducción

En este capítulo se presentan las conclusiones de este trabajo de tesis. Además se incluye una sección para posibles trabajos futuros.

6.2. Conclusiones

- El uso de observadores el efecto de la entrada es cancelado por completo provocando que al obtener un residuo cuando la falla es modelada como aditivas e invariante ante cambios en el control.
- Al utilizar un modelo de fallas multiplicativas provocamos en el residuo obtenido atenuación o amplificación del mismo dependiendo de los cambios en los controladores.
- Se puede apreciar una respuesta unificada cuando se utiliza (o se aplica) un post-filtro al sistema.
- El efecto de las fallas sobre los residuos se puede apreciar de dos diferentes perspectivas; una de

ellas es a través de las variables de estados, y la segunda es a través del dominio de la frecuencia o funciones de transferencia.

- Al utilizar la división de la entrada no sabemos (con seguridad) si está será siempre diferente a 0.
- Al utilizar el método del VCL aseguramos que la entrada $x(t)$ siempre será diferente de 0 debido a la diferencia que existe entre los controladores (el virtual y el real).

6.3. Aportaciones

- En la mayoría de los trabajos revisados solo se utilizan o consideran fallas aditivas, sin embargo en este trabajo se demuestra que el efecto de estas es invariante ante cambios en el control, en lazo abierto o cerrado.
- El efecto de las fallas aditivas y multiplicativas es exactamente el mismo, solo con la diferencia que cuando el modelo de la falla es multiplicativa la entrada del sistema (o la salida del sistema, según sea el caso del modelo utilizado) multiplica a dicho efecto (el efecto como si fuera aditiva).
- Solución al problema de detección de fallas cuando el sistema opera en lazo cerrado desde el punto de vista de variables de estado.
- Solución al problema de detección de fallas cuando el sistema opera en lazo cerrado desde el punto de vista de las funciones de transferencias.
- Extensión del método del VCL (Controlador virtual en lazo cerrado) para la aplicación de detección de fallas.

6.4. Trabajos Futuros

- Llevar a la práctica el circuito ejemplo ya que está hecho con valores reales y comerciales de resistencia, capacitancia e inductancia.
- El poder identificar si la falla es aditiva o multiplicativa.
- Extender los resultados a sistemas no lineales.
- Poder aplicarlo en algún esquema real de control tolerante a fallas.

Bibliografía

- [1] AGÜERO, J., GOODWIN, G., VAN DEN HOF, P. (2011), *A virtual closed loop method for closed loop identification.* , Automatica 47 (2011) 1626-1637.
- [2] ALCORTA GARCÍA, E. (1999), *Modelgestützte Residuengenerierung für die Diagnose von additiven und multiplicativen Fehler in dynamischen Systemen (in german).* , Tesis de doctorado. Gerhard-Mercator University of Duisburg (Duisburg-Essen Universität), Germany.
- [3] ALCORTA GARCÍA, E., R. SELIGER Y P. M. FRANK (1998), *Nonlinear decoupling approach to fault isolation in linear systems.* , En: Proceedings of the American Control Conference 98. Philadelphia, USA. pp. 2867- 2871.
- [4] BAÏKECHE, H., B. MARX, D. MAQUIN Y J. RAGOT (2006), *On parametric and nonparametric fault detection in linear closed loop systems.* , En: Conference on Advanced Control and Diagnosis 2006. Nancy, Francia.
- [5] CHEN, J. Y R. J. PATTON (1999), *Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems.* , Kluwer.
- [6] DING, S. X. (2008), *Model-based fault diagnosis techniques* , Springer.
- [7] DING, S. X., E. L. DING Y T. JEINSCH, *Study on observer based fault detection methods for feedback control systems*, En: Proceedings of the 9th Symposium on Information, Control in Manufacturing, INCOM98. Metz-Nancy, France. (1998). pp. 411-416.

- [8] FELÍCIO, P., J. STOUSTRUP, H. NIEMANN Y P. LOURTIE (2002), *Applying parametric fault detection to a mechanical system*, En: Proceedings of the American Control Conference. Anchorage, Alaska, USA. pp. 4537-4542.
- [9] FELÍCIO, P. Y P. LOURTIE (2005), *Testing parametric fault detection method.*, En: Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on Intelligent Control. IEEE. Limassol, Cyprus. pp. 849-854.
- [10] FRANK, P. M. (1990), *Fault diagnosis in dynamic systems using analytical and knowledge-based redundancy - a survey.*, Automatica 26, 459-474.
- [11] FRANK, P. M. Y S. X. DING (1994), *Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model based fault diagnosis*, Automatica 30(5), 789-804.
- [12] HENRY, D. Y A. ZOLGHADRI (2005), *Design and analysis of robust residual generators for systems under feedback control*, Automatica 41, 251-264.
- [13] JOIN, C., M. FLIESS Y H. SIRA-RAMÍREZ (2004), *Fault diagnosis of closed loop linear systems with parametric uncertainties*, En: Proceedings of the 15th International Workshop on Principles of Diagnosis. Carcassone, France.
- [14] KILSGAARD, S., M. L. RANK, H. H. NIEMANN Y J. STOUSTRUP, *Simultaneous design of controller and fault detector.*, 35 CDC 96, (1996) 628-629
- [15] MARZAT, J., H. PIET-LAHANIER, F. DAMONGEOT Y E. WALTER (2009), *A new model free method performing closed loop fault diagnosis for an aeronautical system.*, En: 7th Workshop on Advances Control and Diagnosis. Zielona, Gora, Poland.
- [16] McNABB, CH. A. Y S. J. QIN (2005), *Fault diagnosis in the feedback invariant subspace of closed loop systems.*, Industrial Engineering and Chemical Research 44, 2359-2368.

- [17] NIEMANN, H. (2006), *A setup for active fault diagnosis.*, IEEE Transactions on Automatic Control 51(9), 1572-1578.
- [18] NIEMANN, H. H. Y J. STOUSTRUP (1997), *Robust fault detection in open loop vs. closed loop.*, En: Proceedings of the 36th Conference on Decision and Control. San Diego, California, U. S. A.. pp. 4496-4497.
- [19] STOUSTRUP, J. Y H. NIEMANN (1999), *Fault detection and isolation in systems with parametric faults.*, En: Proceedings of the IFAC World Congress 1999. IFAC. Beijin, China.
- [20] ZHANG, Y. Y J. JIANG (2008), *Bibliographical review on reconfigurable faulttolerant control systems.*, Annual Reviews in Control 32, 229-252.